

На правах рукописи



**Сидоров Дмитрий Владимирович**

**Алгоритмы и программные средства для вейвлет-сжатия и оценки качества изображений**

05.13.01 — Системный анализ, управление и обработка информации  
(отрасль: промышленность)

**А в т о р е ф е р а т**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

Томск – 2011

Работа выполнена на кафедре вычислительной техники ГОУ ВПО Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
Заслуженный деятель науки РФ  
**Марков Николай Григорьевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, старший  
научный сотрудник  
**Протасов Константин Тихонович**

кандидат технических наук  
**Сарайкин Андрей Витальевич**


Ведущая организация: **Новосибирский государственный  
технический университет**

Защита состоится 28 июня 2011 г. в 15 часов на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.06 при Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу 634034, г. Томск, ул. Советская, 84/3, Институт кибернетики ТПУ, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «    » мая 2011 г.

Ученый секретарь Совета по защите докторских  
и кандидатских диссертаций Д 212.269.06  
кандидат технических наук, доцент

 М.А. Сонькин

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы.

Последние два десятилетия характеризуются резким ростом числа использований цифровых видеотехнологий в промышленности: цифровые охраняемые системы видеонаблюдения за режимными промышленными объектами; видеосистемы мониторинга и удаленного управления процессами добычи угля и каменной соли в добывающей промышленности; системы хранения и передачи космических снимков для нужд нефтегазовой отрасли и т.д. Однако передача и хранение видеоинформации (статических изображений и видеорядов) до сих пор остается наиболее ресурсопотребляемой частью таких цифровых систем. Следует сказать, что в промышленности наиболее распространен фотореалистичный класс изображений (далее будет рассматриваться только этот класс изображений). Согласно Д. Ватолину к этому классу изображений относятся цветные и полутоновые изображения с большой палитрой цветов или полутонов (обычно не менее 256) и плавным изменением яркости.

Одной из важных задач хранения, передачи и обработки видеоинформации является задача сжатия статических изображений. Эта задача решается многими исследователями уже более 20 лет (Д. Ватолин, А. Ратушняк, G.K. Wallace, W.B. Pennebaker и др.) и, несмотря на относительно хорошие результаты (алгоритмы JPEG и JPEG2000), до сих пор остается актуальной.

Существующие алгоритмы сжатия изображений можно разделить на два класса: без потерь и с потерями. Класс алгоритмов сжатия без потерь редко используется для сжатия фотореалистичных изображений, т.к. обеспечивает малый коэффициент сжатия (обычно не более 5). Наиболее распространены алгоритмы сжатия с потерями, в основу которых положено предположение о том, что в исходном изображении содержится информация, которая слабо воспринимается зрительной системой человека (ЗСЧ). При сжатии эта часть информации безвозвратно теряется, что позволяет значительно увеличить коэффициент сжатия изображений при «неизменном», с точки зрения человека, качестве.

На основании анализа результатов отечественных и зарубежных исследований и прикладных проектов по сжатию изображений можно сформулировать основные требования (критерии оценки эффективности) к алгоритмам сжатия изображений с потерями, применяемым в промышленности:

1. малое время сжатия и распаковки (от 40 мс);
2. высокий коэффициент сжатия (до 150);
3. высокое качество восстановленного (распакованного) изображения (пиковое отношение сигнал/шум от 24-26 дБ и более, в зависимости от решаемой прикладной задачи).

На современном этапе развития алгоритмов сжатия изображений алгоритм JPEG2000, пришедший на смену алгоритму JPEG и основанный на вейвлетах, считается лучшим по второму и третьему критериям и принимается многими исследователями и разработчиками за эталон. Однако удовлетво-

ритель первому критерию полностью не удастся, т.к. этот алгоритм сложен в реализации и достаточно требователен к вычислительным ресурсам. Всё сказанное указывает, что задача разработки нересурсоёмких алгоритмов сжатия изображений, используемых в промышленности, до сих пор актуальна.

Отметим, что не все указанные критерии оценки эффективности алгоритмов сжатия легко поддаются численному измерению. Так измерение скорости и коэффициента сжатия является простой задачей, а оценка качества восстановленных (распакованных) изображений во многом зависит от человеческого фактора (мнения экспертов), что делает актуальным вопрос об оценке качества восстановленных изображений без участия человека.

Существует два класса методов оценки качества изображений: субъективный (экспертный) и объективный (математический). Известно, что самые надежные оценки качества изображения обеспечивают субъективные методы, но их применение на практике требует большого количества подготовленных людей и времени. Эффективным решением данной проблемы является применение объективных методов (математических оценок). Исторически объективные методы для оценки качества изображений основывались на простых математических выражениях, таких как среднеквадратичная ошибка или дисперсия (СКО, англ. название MSE) и пиковое отношение сигнал/шум (ПОСШ, англ. название PSNR). Это объясняется сравнительно малой изученностью вопроса о работе ЗСЧ и отсутствием соответствующих статистических данных. Относительно недавно были предложены более сложные в вычислительном плане алгоритмы – SSIM и CW-SSIM (авторы Z. Wang, E. Simoncelli, A. Bovik), которые в ряде приложений показывают хорошую согласованность с экспертными оценками и обладают значительным потенциалом модернизации, цель которой – повышение достоверности результатов оценки качества изображений. Термин *достоверность* здесь и далее, применительно к результатам математической оценки качества изображений, означает, что алгоритм должен давать оценку, максимально близкую к той, которая была получена в ходе экспертного метода. Анализ результатов исследований российских и зарубежных ученых показал, что задача разработки новых и улучшения существующих алгоритмов оценки, например SSIM и CW-SSIM, до сих пор крайне актуальна.

**Целью диссертационной работы** является разработка алгоритмов и программных средств, предназначенных для вейвлет-сжатия и оценки качества восстановленных фотореалистичных статических изображений в промышленности.

Для достижения поставленной цели необходимо последовательное решение следующих задач.

1. Разработка алгоритмов математической оценки качества восстановленных изображений. Решение этой задачи предполагает также исследование эффективности предлагаемых алгоритмов.

2. Разработка алгоритмов вейвлет-сжатия изображений. Решение данной задачи предполагает также исследование эффективности предлагаемых алгоритмов.

3. Создание для разработанных алгоритмов программных средств для вейвлет-сжатия и оценки качества восстановленных изображений, используемых в промышленности.

4. Апробация разработанных алгоритмов и программных средств при решении прикладных задач в промышленности.

#### **Научную новизну полученных в работе результатов определяют.**

1. Алгоритм QWC вейвлет-сжатия фотореалистичных изображений, отличающийся от алгоритма JPEG2000 большим быстродействием при сопоставимом качестве восстановленного изображения (коэффициент сжатия одинаков).

2. Алгоритм BF-QWC вейвлет-сжатия фотореалистичных изображений, разработанный для цифрового сигнального процессора ADSP-BF533 фирмы Analog Devices, отличающийся от алгоритма QWC модифицированным квазииррациональным вейвлет-преобразованием, сокращенной схемой сжатия и адаптированным под источник сигнала квантователем.

3. Модифицированные алгоритмы AWS и FAWS для математической оценки качества восстановленных фотореалистичных изображений, отличающиеся от классического алгоритма CW-SSIM большей достоверностью, а в случае алгоритма FAWS – ещё и большей скоростью вычисления оценки качества.

4. Модифицированные алгоритмы MSSIM и FMSSIM для математической оценки качества восстановленных фотореалистичных изображений, отличающиеся от классического алгоритма SSIM большей достоверностью, а в случае алгоритма FMSSIM – ещё и большей скоростью вычисления оценки качества.

#### **Практическая ценность и реализация результатов работы.**

Практически значимыми являются созданные алгоритмы и программные средства, организованные в виде комплекса программ. Программный комплекс предназначен для вейвлет-сжатия и оценки качества восстановленных фотореалистичных изображений и пригоден для решения практически важных задач в промышленности. Программы написаны на языках Си и ассемблер цифрового сигнального процессора (ЦСП) ADSP-BF533 с использованием сред разработки Microsoft Visual Studio 2008, Embarcadero RAD Studio 2010, VusualDSP++ 5.0 и Anjuta для IBM PC-совместимых компьютеров, суперкомпьютерного кластера (СКК) «СКИФ-политех» и ЦСП ADSP-BF533. Объём исходного кода программ 6700 строк. На программное средство оценки качества изображений получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011612637 от 31.03.2011.

Разработанный комплекс программ был использован для решения следующих практически важных задач в промышленности.

1. Обеспечение видеоидентификации работников в системе контроля доступа (СКД) на режимные объекты предприятий пищевой промышленности. Разработанный программный модуль для СКД обеспечивает оперативный контроль в режиме верификации доступа работника на режимный объект (объекты), т.е. позволяет охраннику производить визуальное сравнение предъявителя пропуска, его фотографии из базы данных отдела кадров и снимка с видеокамеры, который после сжатия сохраняется в базу снимков истории доступа на объект. На основании полученных данных охранник принимает решение о допуске работника на режимный объект.

2. Обеспечение видеонаблюдения для электронных систем удаленного мониторинга и управления угле- и соледобывающими комбайнами. Разработанная видеоподсистема позволяет получать и передавать по цифровым каналам сжатые полутоновые изображения рабочего органа комбайна от цифровой камеры наблюдения к пульту управления, который отображает полученные изображения комбайнеру (оператору). На основании полученных видеоданных комбайнер удаленно управляет и следит за процессом добычи угля (соли).

Разработанные алгоритмы и программные средства для вейвлет-сжатия и оценки качества изображений были внедрены в ОАО «Томское пиво» и ООО «НПФ «Автоматика». Результаты внедрения подтвердили их эффективность при решении практически важных задач в пищевой и угольной отраслях промышленности.

Алгоритмы BF-QWC, AWS, MSSIM и их программные реализации используются в учебном процессе Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Результаты внедрения подтверждены соответствующими актами.

### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Алгоритм QWC позволяет осуществлять сжатие/распаковку фотореалистичных изображений быстрее алгоритма JPEG2000 при сопоставимом качестве восстановленного изображения и одинаковом коэффициенте сжатия.

2. Алгоритм вейвлет-сжатия фотореалистичных изображений BF-QWC для недорогого и малопроизводительного цифрового сигнального процессора ADSP-BF533 фирмы Analog Devices обеспечивает сопоставимые с алгоритмом QWC время сжатия/распаковки, коэффициент сжатия и качество восстановленных изображений.

3. Модифицированные алгоритмы AWS и FAWS позволяют производить математическую оценку качества восстановленных фотореалистичных изображений с большей достоверностью, чем классический алгоритм CW-SSIM, а в случае алгоритма FAWS – ещё и с большей скоростью.

4. Модифицированные алгоритмы MSSIM и FMSSIM позволяют производить математическую оценку качества восстановленных фотореалистичных изображений с большей достоверностью, чем классический алгоритм SSIM, а в случае алгоритма FMSSIM – ещё и с большей скоростью.

### **Апробация работы.**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: IV, V, VI и IX Всероссийских научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии» (г. Томск, 2006, 2007, 2008, 2011 гг.); XIII и XIV Международных научно-практических конференциях студентов и молодых ученых «Современная техника и технологии» (г. Томск, 2007, 2008 гг.); XII Международной научно-технической конференции и выставке «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (г. Москва, 2009 г.), VII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Технологии Microsoft в теории и практике программирования» (г. Томск, 2010 г.).

Результаты диссертационной работы оценивались на конкурсах и получили следующие награды: диплом I степени на IV и V Всероссийских научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии» (г. Томск, 2006, 2007 гг.); диплом II степени на XIV Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2008 г.).

Работа была поддержана грантом программы «Участник Молодежного Научно-Инновационного Конкурса» («У.М.Н.И.К.») Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (проект выполнялся в период 2007-2010 гг.).

По результатам диссертационных исследований опубликовано 10 работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

### **Личный вклад.**

1. Постановка задач диссертационного исследования выполнена автором совместно с Н.Г. Марковым.

2. Разработка алгоритмов сжатия QWC и BF-QWC выполнена совместно с А.Н. Осокиным.

3. Разработка алгоритмов оценки качества восстановленных фотореалистичных статических изображений MSSIM, FMSSIM, AWS, FAWS и программных средств QWC, BF-QWC, ADSP-Reader, IMQ, QWC-A, BFQWC-A проведена автором.

4. Численные эксперименты по исследованию эффективности предложенных алгоритмов вейвлет-сжатия и оценки качества изображений проведены автором.

5. Разработка программного модуля видеоидентификации для системы контроля доступа на режимные объекты предприятий пищевой промышленности проведена автором. Внедрение модуля осуществлено в ОАО «Томское пиво» совместно с сотрудниками предприятия Бойко Е.Н и Насоновым А.С.

6. Разработка программного модуля видеоподсистемы в составе электронной системы мониторинга и удаленного управления угле- и соледобывающими комбайнами проведена автором. Внедрение программного модуля

в опытный образец системы мониторинга и удаленного управления угольными комбайном КП21ДР осуществлено в ООО «НПФ «Автоматика» совместно с сотрудниками предприятия Барановым А.Ю. и Ануфриевым А.С.

### **Объем и структура работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 100 наименований и трех приложений. Объем диссертации составляет 148 страниц машинописного текста, иллюстрированного 27 рисунками и 19 таблицами.

### **Содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность работы в данном научном направлении, формулируются цель и задачи диссертационного исследования.

**Первая глава** посвящена анализу существующих алгоритмов сжатия цветных и полутоновых фотореалистичных изображений и оценке их качества.

В первом разделе главы приведена классификация основных (наиболее распространенных) алгоритмов сжатия цветных и полутоновых фотореалистичных изображений. Приведены основные требования (критерии оценки эффективности) к алгоритмам сжатия изображений с потерями, используемым в промышленности:

1. малое время сжатия и распаковки (от 40 мс);
2. значительный коэффициент сжатия (до 150);
3. высокое качество восстановленного изображения (ПОСШ от 24-26 дБ и более, в зависимости от решаемой прикладной задачи).

Кроме этих требований в промышленности к таким алгоритмам часто предъявляется дополнительное требование – простота программно-аппаратной реализации алгоритмов сжатия изображений.

Проведен анализ основных наиболее распространенных алгоритмов сжатия цветных и полутоновых фотореалистичных изображений на соответствие этим требованиям (критериям). Показано, что на данный момент по второму и третьему критериям лучшим алгоритмом сжатия изображений признан JPEG2000, основанный на вейвлетах. Однако этот алгоритм не удовлетворяет первому и дополнительному критериям, т.к. он сложен в реализации и достаточно требователен к вычислительным ресурсам. Проведенный анализ показал, что задачи упрощения алгоритма сжатия JPEG2000, равно как и разработки новых алгоритмов вейвлет-сжатия, в том числе пригодных для программно-аппаратной реализации на современных недорогих вычислительных средствах, продолжают оставаться актуальными.

Во втором разделе главы рассмотрена проблема получения достоверных оценок качества изображений, т.к. она играет одну из ключевых ролей при исследовании эффективности алгоритмов сжатия изображений. Приведена классификация методов оценки качества изображений и рассмотрены наиболее распространенные алгоритмы получения таких оценок. Известно, что самыми надежными методами оценки качества изображения считаются субъек-



тивные методы (экспертные оценки), но их применение требует большого количества подготовленных людей и значительного количества времени, и, как правило, поэтому они малопригодны для использования в реальных ситуациях. Эффективным решением данной проблемы является применение объективных методов (алгоритмов) для проведения математических оценок, дающих максимально приближенную к экспертному подходу оценку качества изображений. Выявлено, что алгоритмы, основанные на простых математических выражениях, таких как СКО или дисперсия (англ. название MSE) и ПОСШ (англ. название PSNR), дают невысокую достоверность при оценке качества изображений. Это объясняется сравнительно малой изученностью вопроса о работе ЗСЧ и отсутствием соответствующих статистических данных. Широкая распространенность этих алгоритмов объясняется простотой их программной реализации. Относительно недавно были предложены более сложные в вычислительном плане алгоритмы – SSIM (индекс структурного сходства) и CW-SSIM (вейвлет-индекс структурного сходства), которые в ряде приложений показывают хорошую согласованность с субъективными оценками качества изображений и обладают значительным потенциалом для модификации. На основании проведенного анализа сделан вывод о том, что задача разработки новых и улучшения существующих, например SSIM и CW-SSIM, алгоритмов оценки качества изображений до сих пор актуальна.

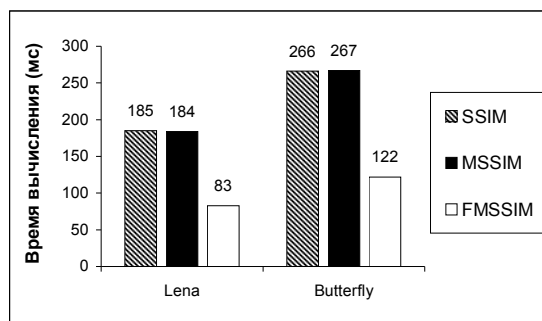
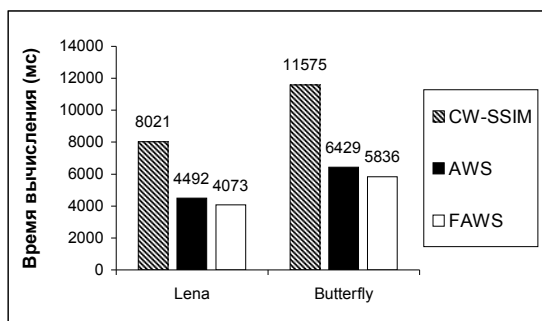
На основании проведенного анализа состояния проблемы сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

**Во второй главе** рассмотрены алгоритмы оценки качества восстановленных фотореалистичных изображений, положенные в основу программного комплекса. Подробно описаны и рассмотрены известные алгоритмы SSIM и CW-SSIM, дающие наиболее приближенные к экспертной оценке результаты оценки качества изображений. Выявлены основные недостатки указанных алгоритмов и предложены пути их преодоления. Поставлено два численных эксперимента, для проведения которых были разработаны специализированные программные средства. Первый численный эксперимент нацелен на подбор значений коэффициентов (параметров) комплексного дискретного ориентированного вейвлет-преобразования (количества шагов и ориентированных высокочастотных диапазонов) в алгоритме CW-SSIM с тем, чтобы повысить достоверность получаемых оценок качества изображений и скорость их вычисления. На основании полученных результатов предложены два модифицированных алгоритма оценки качества восстановленных изображений AWS и FAWS. Цель второго эксперимента – поиск значений весовых коэффициентов (показателей степеней составляющих оценки для окна: яркости, контраста и структуры) алгоритма SSIM, также повышающих достоверность оценок качества изображений и скорость их вычисления. На основании полученных результатов предложены два модифицированных алгоритма оценки качества изображений MSSIM и FMSSIM.

Предложенные алгоритмы AWS, FAWS, MSSIM и FMSSIM были исследованы на скорость получения оценки качества двух изображений из набора

Calgary Corpus: Lena (файл lena.bmp, размер изображения 512x512 пикселей, полутоновое, глубина 8 бит на пиксель) и Butterfly (файл but.bmp, размер изображения 768x512 пикселей, полутоновое, глубина 8 бит на пиксель). Исследование проводилось на ПК со следующими основными характеристиками: ЦП – Athlon 4000+ (2,6 ГГц, одноядерный); ОЗУ – DDR2 800 МГц, 4 Гбайт; ОС – Windows XP SP3 32 разрядная версия. Результаты исследования представлены на рис. 1 (показано минимальное замеренное время вычисления оценки). На основании этих результатов исследования сделаны следующие основные выводы:

1. алгоритм MSSIM значительно не уступает в скорости вычисления оценки своей исходной реализации (алгоритму SSIM);
2. алгоритмы AWS, FAWS и FMSSIM значительно превосходят в скорости вычисления оценки (относительное время сократилось не менее чем на 44%) свои соответствующие исходные реализации.



а – результаты исследования для алгоритмов CW-SSIM, AWS и FAWS.

б – результаты исследования для алгоритмов SSIM, MSSIM и FMSSIM.

Рис. 1. Результаты исследования предложенных алгоритмов на скорость вычисления оценки

Модифицированные алгоритмы оценки качества изображений AWS, FAWS, MSSIM, FMSSIM и их классические аналоги были исследованы на достоверность оценки качества на эталонном наборе изображений TID2008. Этот набор состоит из 1700 специально отобранных и сгенерированных изображений, позволяющих при тестировании (исследовании) на нем различных алгоритмов оценки качества изображений определять наличие корреляции и коэффициенты корреляции между значениями алгоритма и численной оценкой человеческого восприятия качества изображений.

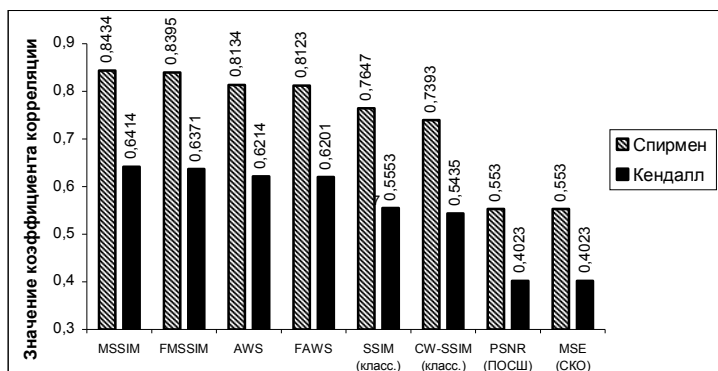


Рис. 2. Результаты исследования алгоритмов оценки качества изображений на достоверность

Экспертные оценки качества для этого набора изображений были предоставлены вместе с набором. Достоверность оценок качества изображений определялась с помощью непараметрических методов Спирмена и Кендалла. Результаты представлены на рис. 2.

Согласно результатам исследования (рис. 2) все предложенные алгоритмы обеспечивают более достоверную оценку качества (не менее чем на 10% относительно аналогов), нежели их классические аналоги CW-SSIM, SSIM и наиболее распространенные алгоритмы PSNR и MSE.

**Третья глава** посвящена разработке алгоритмов вейвлет-сжатия изображений, пригодных для практического применения в промышленности.

Разработка алгоритма вейвлет-сжатия QWC осуществлялась посредством упрощения и исключения определенных этапов обработки изображения из алгоритма JPEG2000, но с учётом предъявленных ранее требований (критериев оценки эффективности) к алгоритмам сжатия изображений в промышленности. Обобщённые схемы алгоритмов JPEG2000 и QWC приведены на рис. 3.

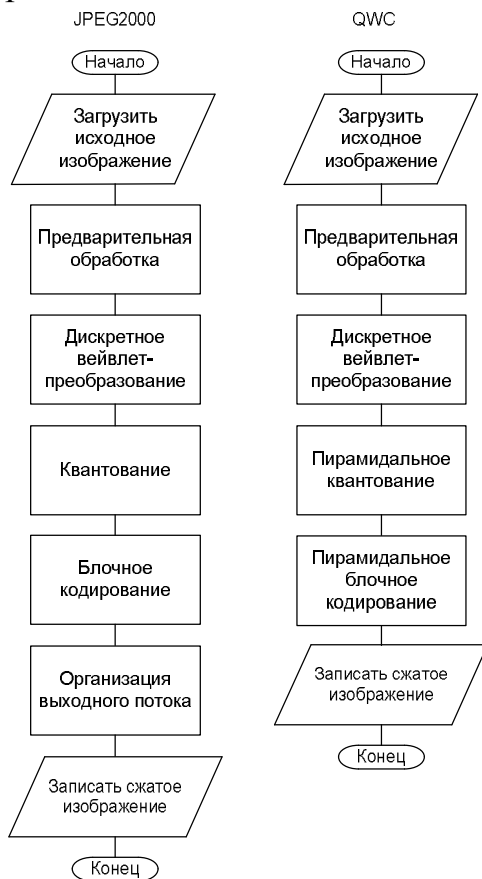


Рис. 3. Обобщённые схемы алгоритмов JPEG2000 и QWC

коэффициент (найден в ходе численного эксперимента),  $Q_1$  – начальный коэффициент квантования (найден в ходе численного эксперимента).

В алгоритме сжатия QWC так же, как и в алгоритме JPEG2000, главным параметром при сжатии изображения, который указывает пользователь, является коэффициент сжатия  $K_c$  (размер сжатого файла). Но коэффициент сжатия  $K_c$  не единственный параметр, участвующий в процессе сжатия, начальный коэффициент квантования  $Q_1$  и поправочный коэффициент  $L$  также должны быть заданы. Так как пользователю удобно задавать только коэффициент сжатия  $K_c$ , то следует определить зависимость коэффициента кванто-

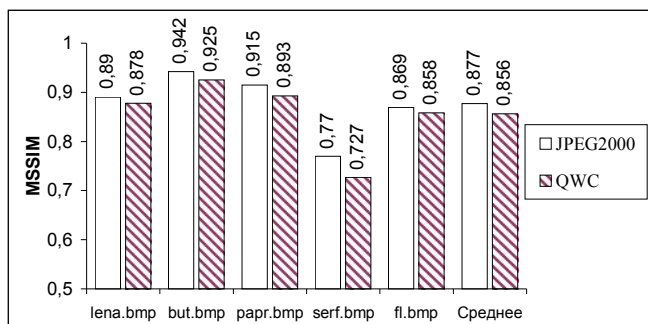
В ходе разработки алгоритма QWC предложена оригинальная схема квантования и упаковки вейвлет-коэффициентов, существенно упрощающая и ускоряющая выполнение аналогичного этапа квантования в алгоритме JPEG2000. При реализации схемы свертки вейвлет-коэффициентов сделано предположение о том, что эти коэффициенты на более высоких уровнях разложения обладают большей энергией, чем на нижних, следовательно, должны квантоваться менее грубо. Так как к разрабатываемому алгоритму предъявляется требование простоты реализации и, соответственно, высокой скорости работы, то коэффициенты квантования  $Q_i$  для каждого уровня вычисляются из коэффициента квантования нижестоящего уровня согласно формуле:

$$Q_i = L^{i-1} Q_1,$$

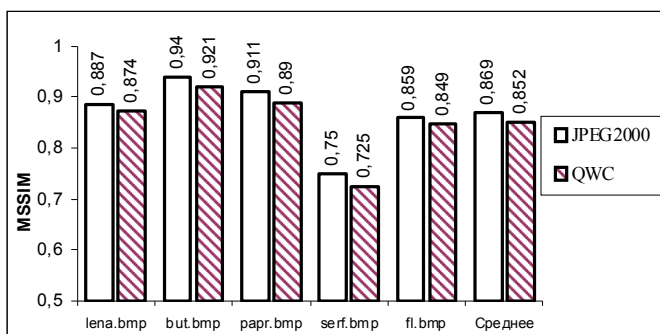
где  $i$  – уровень вейвлет-преобразования (начиная со второго),  $L$  – поправочный

вания  $Q_1$  и поправочного коэффициента  $L$  от коэффициента сжатия  $K_c$ . Поиск коэффициентов  $Q_1$  и  $L$  для каждого конкретного сжимаемого изображения является достаточно длительным процессом. Поэтому для облегчения этого процесса зависимости начального коэффициента квантователя  $Q_1$  и поправочного коэффициента  $L$  от  $K_c$  были предварительно получены в ходе компьютерного численного эксперимента. Для проведения эксперимента по поиску этих коэффициентов, который проводился на СКК «СКИФ-политех», была разработана специальная программа на языке Си.

Разработанный алгоритм QWC для вейвлет-сжатия цветных и полутоновых изображений был исследован на эталонном наборе Calgary Corpus. На рис. 4 приведены усредненные диаграммы результатов исследования алгоритмов QWC и JPEG2000 на качество распакованных изображений для ряда цветных и полутоновых изображений (полутоновые изображения были получены путем конвертирования из цветных) из набора Calgary Corpus. Изображения сжимались в 20, 50, 100 и 150 раз. Оценка качества восстановленных изображений производилась с использованием предложенного алгоритма MSSIM.



а – результаты для цветных изображений

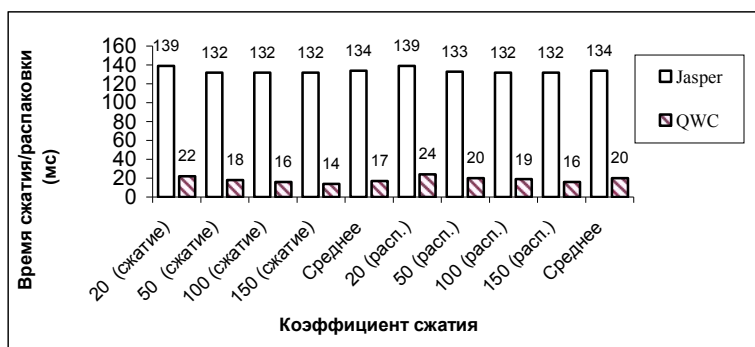


б – результаты для полутоновых изображений

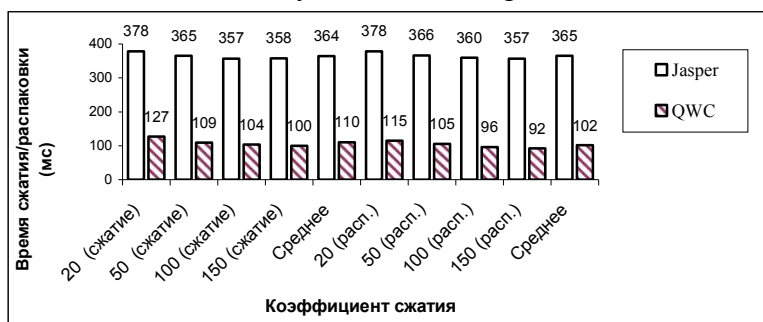
Рис. 4. Результаты исследования алгоритмов JPEG2000 и QWC на качество распакованных изображений

На рис. 5 в качестве примера приведена часть результатов исследования разработанного алгоритма QWC на скорость сжатия/распаковки изображений в сравнении с алгоритмом JPEG2000. Для алгоритма JPEG2000 взята его программная реализация от Jasper, т.к. она доступна в исходном коде и позволяет провести профилирование. Исследуемое изображение – Flower из набора Calgary Corpus (файл fl.bmp, размер изображения 768x512 пикселей, цветное, глубина 24 бит на пиксель). Полутоновое изображение (глубина 8 бит на пиксель) было получено путем конвертирования из исходного цветного изображения. Методика замера времени сжа-

тия/распаковки такая же, как при исследовании алгоритмов оценки качества изображений на скорость вычисления оценки (глава 2). Исследование проводилось на ПК со следующими основными характеристиками: ЦП – Athlon 3500+ (2,2 ГГц, одноядерный); ОЗУ – DDR2 800 МГц, 4 Гбайт; ОС – Windows XP SP3 32 разрядная версия.



*a* – для полутонового изображения



*b* – для цветного изображения

Рис.5. Результаты исследования на скорость сжатия/распаковки изображения Flower

алгоритма QWC – алгоритм BF-QWC, предназначенная для реализации на ЦСП ADSP-BF533 фирмы Analog Devices и отличающаяся модифицированным квазииррациональным вейвлет-преобразованием, сокращенной схемой сжатия и адаптированным под источник сигнала квантователем.

Схема алгоритма BF-QWC соответствует схеме алгоритма QWC (рис. 3) за исключением следующего:

1. отсутствует этап предварительной обработки;
2. используется квазииррациональное дискретное вейвлет-преобразование с целью повышения скорости его выполнения на ЦСП;
3. используются адаптированные под источник сигнала (аналоговая видеокамера стандарта PAL) коэффициенты квантователя.

Разработанный алгоритм BF-QWC был программно реализован на ЦСП ADSP-BF533, а его эффективность исследована с использованием отладочной платы ADSP-BF533 EZ-KIT Lite. Часть результатов исследований на качество восстановленных изображений при неизменном коэффициенте сжатия приведена на рис. 6. Исходные данные – четыре произвольные полутоновые изображения, оцифрованные с аналоговой видеокамеры стандарта PAL. Изображения сжимались в 20 и 50 раз. Оценка качества восстановленных изображений производилась с использованием алгоритма MSSIM. Значение коэффициента сжатия в исследовании было ограничено 50-ю, т.к. при его дальнейшем увеличении значения оценок качества изображений, сжатых и распакованных с помощью алгоритмов BF-QWC и QWC, значительно не отличаются.

Результаты исследований (рис. 4 и 5) показали, что разработанный алгоритм QWC отличается от алгоритма JPEG2000 большим быстродействием при сопоставимом качестве восстановленного изображения (коэффициент сжатия неизменен) и поэтому в большей степени, чем алгоритм JPEG2000, удовлетворяет требованиям, которые предъявляются промышленностью к алгоритмам сжатия изображений.

Во второй части главы рассмотрена предложенная модификация ал-

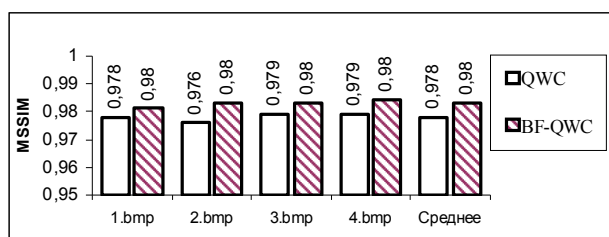


Рис. 6. Результаты исследования алгоритмов QWC и BF-QWC на качество распакованных полутоновых изображений

Результаты проведенного исследования показали, что модифицированный для ЦСП ADSP-BF533 алгоритм BF-QWC не уступает исходному алгоритму QWC по качеству восстановленных цветных и полутоновых изображений (при неизменном коэффициенте сжатия).

На рис. 7 в качестве примера, приведена часть результатов исследования алгоритма BF-QWC на скорость сжатия/распаковки произвольных полутоновых изображений размером 560x400 пикселей. Изображения были получены путём отбрасывания краевых пикселей от исходных изображений, которые были оцифрованы с аналоговой камеры стандарта PAL.

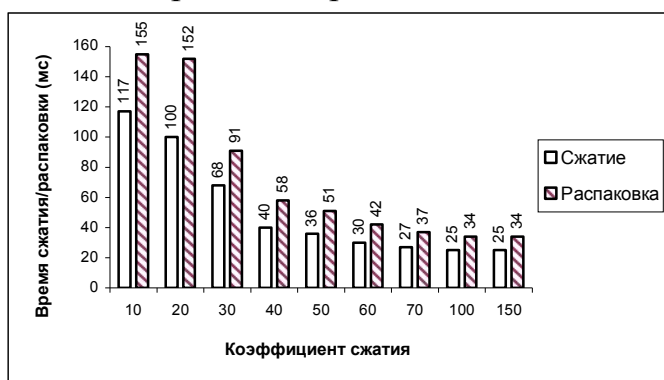


Рис. 7. Результаты исследования алгоритма BF-QWC на скорость сжатия/распаковки

Результаты исследования предложенного алгоритма BF-QWC на скорость сжатия/распаковки изображений подтвердили, что этот алгоритм полностью удовлетворяет требованиям, которые предъявляются к аппаратно-ориентированным алгоритмам сжатия изображений в промышленности.

**В четвертой главе** рассмотрены созданные программные средства для вейвлет-сжатия и оценки качества восстановленных фотореалистичных изображений и приведены результаты их апробации при решении практически важных задач в промышленности. При разработке программных средств, с учетом их последующего применения в промышленности, предъявлялись следующие требования.

1. Обеспечить вейвлет-сжатие цветных (глубина 24 бита на пиксель) и полутоновых (глубина 8 бит на пиксель) изображений путем реализации алгоритма QWC. Тип интерфейса взаимодействия с пользователем – консольный.

2. Обеспечить вейвлет-сжатие цветных и полутоновых изображений на ЦСП ADSP-BF533, получаемых с аналоговой камеры стандарта PAL, путем реализации алгоритма BF-QWC. Тип интерфейса взаимодействия с пользователем (при программной реализации на ПК) – графический. Взаимодействие с пользователем, при реализации для ЦСП, осуществляется посредством специальной программы (на рис. 8 обозначена как ADSP-Reader).

3. Обеспечить возможность поиска такого соотношения коэффициентов квантователя алгоритмов QWC и BF-QWC, которые бы приводили к по-

вышению качества восстановленного изображения при заданном коэффициенте сжатия. Тип интерфейса взаимодействия с пользователем – консольный.

4. Обеспечить возможность оценки качества восстановленных изображений путем реализации алгоритмов MSSIM, FMSSIM, AWS и FAWS. Тип интерфейса взаимодействия с пользователем – графический.

Согласно изложенным требованиям была предложена обобщенная структура программного комплекса для вейвлет-сжатия и оценки качества изображений, приведенная на рис. 8. Программный комплекс написан на языках Си и ассемблере ЦСП ADSP-BF533 с использованием сред разработки Microsoft Visual Studio 2008, Embarcadero RAD Studio 2010, VusualDSP++ 5.0 и Anjuta для IBM PC-совместимых компьютеров, суперкомпьютерного кластера (СКК) «СКИФ-политех» и ЦСП ADSP-BF533. Объем исходного кода программ 6700 строк. На программное средство оценки качества изображений получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2011612637 от 31.03.2011 (на рис. 8 обозначено как IMQ).

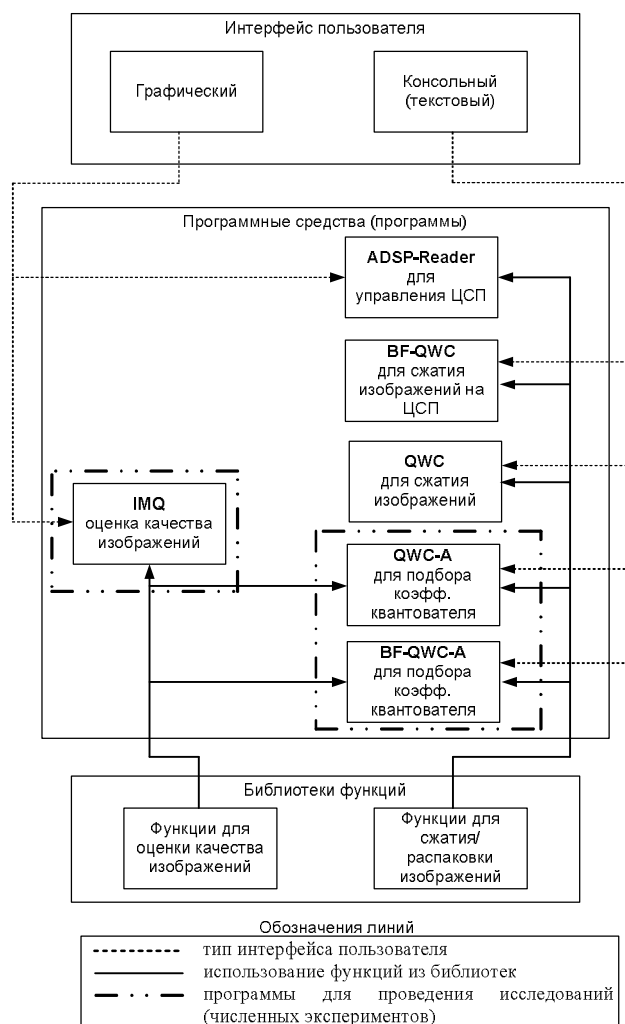


Рис. 8. Обобщенная структура программного комплекса для вейвлет-сжатия и оценки качества восстановленных изображений

Разработанный программный комплекс был использован при решении следующих практически важных задач в промышленности.

1. Обеспечение видеоидентификации в системе контроля доступа на режимные объекты пищевой промышленности. Разработанный программный модуль для СКД обеспечивает оперативный контроль в режиме верификации доступа работника на режимный объект (объекты), т.е. позволяет охраннику производить визуальное сравнение предъявителя пропуска, его фотографии из базы данных отдела кадров и снимка с видеокамеры, который в сжатом виде сохраняется в базу снимков истории доступа. Модуль позволяет вести историю произошедших событий видеоидентификации (событие описывается следующими данными: снимки с видеокамер, номер карты доступа работника, время доступа, номер пропускного пункта и

тип режимного объекта) на период не менее 6 месяцев. Результаты апробации разработанного модуля на режимных объектах ОАО «Томское пиво»

подтвердили эффективность разработанных алгоритмов QWC и MSSIM при этом значительно снизились требования к объёму хранилища данных о событиях (относительный объём сократился на 25%) и производительности персональных компьютеров, расположенных на пропускных пунктах предприятия.

2. Обеспечение видеонаблюдения для электронных систем удалённого мониторинга и управления угле- и соледобывающими комбайнами. Созданная видеоподсистема на основе ЦСП ADSP-BF533 позволяет получать и передавать (с частотой 1 кадр/с) по узкополосным цифровым линиям (максимальная скорость 28,8 кбод) сжатые полутоновые изображения рабочего органа комбайна от цифровой камеры наблюдения к пульту управления, который отображает полученное изображение комбайнеру (оператору) и позволяет удаленно управлять рабочим органом комбайна. Апробация разработанной видеоподсистемы производилась на опытном образце системы удаленного мониторинга и управления проходческим угольным комбайном КП21ДР, разрабатываемой в ООО «НПФ «Автоматика». Результаты апробации подтвердили, что алгоритм сжатия BF-QWC позволяет осуществлять сжатие/распаковку изображений с требуемыми параметрами на малопроизводительной вычислительной аппаратуре, построенной на основе таких ЦСП как ADSP-BF533.

Алгоритмы BF-QWC, AWS, MSSIM и их программные реализации используются в учебном процессе Института кибернетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**В заключении** приведены основные результаты и выводы по диссертационной работе.

**В приложения** вынесены копии актов о внедрении полученных результатов, копия свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ и часть результатов численных экспериментов.

### **Основные результаты и выводы**

Диссертационная работа посвящена созданию алгоритмов и программных средств для вейвлет-сжатия и оценки качества восстановленных фотореалистичных изображений в промышленности. Получены следующие основные научные и практические результаты.

1. Сформулированы основные требования, предъявляемые в промышленности к разрабатываемым алгоритмам сжатия фотореалистичных изображений. На основании этих требований проведен анализ наиболее распространенных алгоритмов сжатия изображений. По результатам анализа выбран наиболее перспективный для последующих исследований и разработок класс алгоритмов сжатия на основе вейвлетов.

2. Проведен анализ методов и алгоритмов оценки качества изображений. Согласно результатам анализа для дальнейших исследований выбран класс эталонных алгоритмов математической (объективной) оценки качества восстановленных изображений.



3. Разработан алгоритм QWC вейвлет-сжатия цветных и полутоновых изображений. Результаты исследований этого алгоритма показали, что он позволяет сжимать изображения с большей скоростью, чем алгоритм JPEG2000 при сопоставимом качестве восстановленного изображения (коэффициент сжатия одинаков).

4. Разработан алгоритм BF-QWC вейвлет-сжатия цветных и полутоновых изображений для недорогого и малопроизводительного цифрового сигнального процессора ADSP-BF533 фирмы Analog Devices. Результаты проведенного исследования этого алгоритма показали, что он не уступает алгоритму QWC по качеству восстановленных изображений при неизменном коэффициенте сжатия, а также полностью удовлетворяет требованиям, которые предъявляются к программно-аппаратным средствам сжатия изображений в промышленности.

5. Предложены модифицированные алгоритмы математической оценки качества восстановленных изображений AWS и FAWS. Результаты проведенных численных экспериментов показали, что предложенные модификации обладают большей скоростью получения оценок качества изображений, чем исходный алгоритм CW-SSIM.

6. Предложены модифицированные алгоритмы математической оценки качества восстановленных изображений MSSIM и FMSSIM. Результаты проведенных численных экспериментов показали, что предложенный модифицированный алгоритм MSSIM не уступает в скорости вычисления оценок качества изображений исходному алгоритму SSIM, а алгоритм FMSSIM значительно его превосходит.

7. Проведено исследование предложенных и наиболее распространенных алгоритмов оценки качества восстановленных изображений на достоверность получаемых оценок. Результаты исследования показали, что предложенные алгоритмы MSSIM/FMSSIM и AWS/FAWS эффективнее наиболее распространенных алгоритмов SSIM, CW-SSIM, PSNR (ПОСШ) и MSE (СКО).

8. Предложена структура программного комплекса для вейвлет-сжатия и оценки качества восстановленных изображений. Созданы программные средства и библиотеки функций на языках Си и ассемблер (для ЦСП ADSP-BF533), реализующие предложенные алгоритмы. Объем исходного кода программ составляет 6700 строк.

9. Проведена апробация разработанных алгоритмов и программных средств при решении практически важных задач в угольной и пищевой отраслях промышленности. Результаты решения этих задач подчеркивают практическую значимость работы и подтверждают эффективность созданных алгоритмов и программ для сжатия и оценки качества изображений.

10. Осуществлено внедрение разработанных алгоритмов и программных средств в ООО «НПФ «Автоматика», ОАО «Томское пиво» и учебный процесс Института кибернетики Национального исследовательского Томского

политехнического университета, о чём свидетельствуют полученные акты о внедрении.

### **Основные публикации по теме диссертации**

#### **Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:**

1. Сидоров Д.В., Осокин А.Н. Простой алгоритм вейвлет-сжатия полутоновых и цветных изображений // Известия Томского политехнического университета. – 2007 – Т. 311. – № 5. – С. 86-91.

2. Сидоров Д.В. Осокин А.Н. Марков Н.Г. Оценка качества изображений с использованием вейвлетов // Известия Томского политехнического университета. – 2009 – Т.315. – № 5. – С. 104-107.

3. Сидоров Д.В. Модификация алгоритма SSIM // Прикладная информатика. – 2010. – № 4. – С. 55-57.

#### **Статьи, тезисы докладов на международных и всероссийских конференциях:**

4. Сидоров Д.В., Осокин А.Н. Исследование вейвлет-преобразований, ориентированных на аппаратную реализацию // Молодежь и совр. информ. технологии: Сб. трудов IV Всеросс. научно-практической конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2006. – С. 403-404.

5. Сидоров Д.В., Осокин А.Н. Аппаратно-ориентированный субполосный квантователь для вейвлет-сжатия полутоновых изображений // Молодежь и совр. информ. технологии: Сб. трудов V Всеросс. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2007. – С. 446-448.

6. Сидоров Д.В., Осокин А.Н. Неравномерный субполосный квантователь для вейвлет-сжатия полутоновых и цветных изображений // Совр. техника и технологии: Труды XIII Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2007 – Т. 2. – С. 431-433.

7. Сидоров Д. В., Осокин А.Н. Реализация алгоритма вейвлет-сжатия изображений для сигнального процессора BF533 фирмы ANALOG DEVICE // Совр. техника и технологии: Труды XIV Междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2008. – Т.2. – С. 431-433.

8. Сидоров Д.В. Программная реализация метода оценки качества изображений SSIM // Молодежь и совр. информ. технологии: Сб. трудов VI Всеросс. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2008. – С. 151-152.

9. Сидоров Д.В. К вопросу оценки качества восстановленных изображений // Прикладная информатика. – 2008. – №4. – С. 1-4.

10. Сидоров Д.В. Осокин А.Н. QWC алгоритм вейвлет-сжатия изображений // Труды Российского научно-техн. общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение. – М., 2009. – Вып. XI-2. – С. 396-399.

#### **Свидетельства на программы для ЭВМ:**

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Оценка качества изображений» №2011612637 от 31.03.2011.