

На правах рукописи



Сафонов Илья Владимирович

**МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ СИСТЕМ
СКАНИРОВАНИЯ И ПЕЧАТИ**

2.3.8 – Информатика и информационные процессы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре «Информатика и процессы управления» Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Научный консультант: **Матвеев Иван Алексеевич**, доктор технических наук, главный научный сотрудник ФИЦ ИУ РАН

Официальные оппоненты: **Андрианов Дмитрий Евгеньевич**, доктор технических наук, доцент, заместитель директора по учебной работе, заведующий кафедрой Муромского института (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых»
Куприянов Александр Викторович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической кибернетики ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»
Ташлинский Александр Григорьевич, доктор технических наук, профессор, директор НИЦ обработки цифровых изображений и сигналов «Сигнал» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»

Защита состоится «__» _____ 2026 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета 24.1.224.03 на базе ФИЦ ИУ РАН по адресу: 119333, Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 42.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук и на сайте <https://www.frccsc.ru/>.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.224.03,
к.т.н.

И.А. Рейер

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Несмотря на существующую тенденцию перехода на безбумажные технологии и электронный документооборот, Офисные устройства печати – принтеры широко используются как в промышленности и органах государственного управления, так и для персональных нужд. За последние 25 лет мировой рынок печатающих устройств, расходных материалов и сервиса печати продемонстрировал огромный рост. Во второй декаде XXI века произошел массовый переход от принтеров, используемых исключительно для печати и реализованных как периферийные устройства, подключенные по локальному интерфейсу к персональному компьютеру (ПК), к многофункциональным устройствам (МФУ, или многофункциональным принтерам, МФП), позволяющим выполнять печать, сканирование, копирование и другие функции. При этом МФП способен работать как при подключении к ПК по локальному интерфейсу или по сети, так и в качестве самостоятельного устройства. В сочетании с прикладным и системным программным обеспечением (ПО), устанавливаемым на ПК, мобильные устройства, а также в локальной и глобальной сети, современные МФП представляют собой информационные системы сканирования и печати.

В настоящее время развиты базовые технологии офисных устройств печати, однако остаются нерешёнными задачи, связанные с автоматическим повышением качества отпечатков и сохраняемых электронных документов, особенно специальных видов, экономией расходных материалов, добавлением в напечатанные документы защитных элементов. Зачастую пользователь вынужден либо удовлетворяться результатами недостаточно высокого качества, либо вручную обрабатывать изображения с помощью дополнительного ПО, что неэффективно, так как ведёт к затратам времени и средств, требует специальных знаний. Рост мощности вычислительных платформ и бурное развитие теорий цифровой обработки изображений, компьютерного зрения и распознавания образов привели к появлению большого количества способов обработки фотографий и изображений документов. Однако, их применение в системах сканирования и печати часто затруднено в силу специфики процесса обработки информации (цветоделение, растривание и т.п.) и наличия в МФП существенно меньших вычислительных ресурсов по сравнению с ПК. Актуально улучшение потребительских свойств систем сканирования и печати за счёт совершенствования существующих и разработки множества новых автоматических режимов работы, удовлетворяющих требованиям к качеству и производительности, задаваемым существующими стандартами.

Для модернизации существующих систем требуется добавление дополнительного функционала в существующие МФП за счёт модификации ПО, в частности встроенного ПО (анг. термин *firmware*), например, процессора растровых изображений (*raster image processor, RIP*). Возникает *противоречие в практике* между необходимостью добавления широкого набора новых режимов работы и ограниченными ресурсами МФП, в том числе размером памяти для хранения встроенного ПО.

Научная актуальность исследования проистекает из *противоречия в науке*, которое обусловлено следующими недостатками существующего научно-методического аппарата (НМА) разработки методов обработки изображений для модернизации систем сканирования и печати: каждый отдельный режим сканирования и печати разрабатывается как независимая уникальная научно-исследовательская работа (НИР) без выявления общих черт для классов сходных задач и без учёта уже используемых в МФП функций и архитектуры, а также типичных для подобных НИР рисков; в настоящее время глубоко проработанными являются методы обработки и улучшения изображений реализованные для ПК и предназначенные для просмотра результатов обработки на экране, тогда как улучшение напечатанных с помощью офисной техники изображений исследовано в недостаточной степени. Актуально развитие НМА, в частности формулировка методологии НИР при создании решений для систем сканирования и печати, формализация методик, принципов и подходов к разработке методов обработки изображений, оптимизированных под возможности программно-аппаратного обеспечения МФП и удовлетворяющих требованиям к качеству и производительности.

Таким образом, *актуальным* является *изложение новых научно обоснованных технических и организационных решений* по разработке методов обработки изображений для систем сканирования и печати, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие индустрии офисной печати.

Степень разработанности темы. Достижения ряда научных коллективов Российской Федерации в разработке теории и практических подходов к обработке и распознаванию цифровых фотографий и изображений документов имеют непосредственное отношение к рассматриваемым задачам. В первую очередь, на материалы, представленные в диссертации, оказали влияние научные группы под руководством Ю.М. Баяковского (МГУ им. М.В. Ломоносова), Ю.И. Журавлёва (Вычислительный центр РАН), В.Л. Арлазарова (Институт системного анализа РАН), В.А. Сойфера (Институт систем обработки изображений РАН), В.Б. Бетелина (Научно-исследовательский институт системных исследований РАН), Л.П. Ярославского (Институт проблем передачи информации РАН), В.Н. Вапника (Институт проблем управления РАН).

Основной вклад в разработку технологий принтерной печати внесли американские и японские компании, в первую очередь, Xerox, HP, Lexmark, Epson, Canon и Ricoh. Среди учёных, внёсших заметный вклад в направления обработки, обсуждаемые в диссертации, можно выделить J.P. Allebach, R. Eschbach, R.L. de Queiroz, R. Bala, S.Wang, D.R. Tretter, R.A. Ulichney, H. Luo, J. Yen, N. Moroney, D. Shaked, C.B. Atkins, X. Lin, C.A. Bouman, H.Siddiqui, A.R. Rao, M. Ahmed, R. Ward, K. Seto, T. Kawana. Исследователями корпораций – производителей принтеров и МФП разработано большое число базовых функций обработки изображений, применяемых в МФП. Тем не менее, остаётся множество возможностей, как для улучшения существующих способов обработки, так и для изобретения и внедрения новых.

Цель диссертационного исследования состоит в улучшении потребительских свойств информационных систем сканирования и печати за счёт совершенствования существующих и разработки комплекса новых режимов работы, удовлетворяющих требованиям к качеству и производительности в условиях ограничений, накладываемых аппаратным обеспечением.

Общая научная задача – развитие научно-методического аппарата разработки и реализации методов обработки изображений для создания комплекса новых и модернизированных решений в системах сканирования и печати в условиях существующих ограничений и требований.

Общая научная задача декомпозируется на совокупность **частных научных задач**:

1. формулировка методологии научно-исследовательской работы при создании новых решений для систем сканирования и печати;
2. разработка методики (совокупности методов и последовательность их применения) реализации множества режимов сканирования;
3. формулировка подходов к реализации специальных режимов печати, направленных на экономию расходных материалов и встраивания элементов защиты, и для автоматической слепой оценки и улучшения качества печатаемых фотографий;
4. разработка принципов автоматического выбора и размещения изображений на странице;

и **частных прикладных задач**:

5. разработка модулей для режимов сканирования, которые корректируют типичные дефекты сканированных изображений и выполняют сегментацию на области текста, картинок и фона;
6. поиск и реализация технических решений для встраивания в процессор растровых изображений новых режимов печати;
7. разработка группы преобразований для изменения размеров и соотношения сторон документов и фотографий без модификации основных смысловых элементов изображения.

Объектом исследования являются информационные системы сканирования и печати.

Предметом исследования является набор потребительских свойств информационных систем сканирования и печати, а именно режимы сканирования, копирования и печати, связанные с обработкой изображений.

Научная новизна:

1. Сформулирована оригинальная спиральная методология научно-исследовательской работы при создании решений для систем сканирования и печати, которая включает в себя структуру и логическую организацию этапов исследования и разработки, и направлена на минимизацию риска отсутствия внедрения результата исследования в продукт, впервые выявлены и ранжированы факторы подобного риска.
2. Изложена методика (совокупность методов и последовательность их применения) режимов сканирования, основанная на предложенной автором

комбинации следующих подходов: а) предварительная оценка параметров обработки выполняется по изображению низкого разрешения, затем изображение заданного разрешения обрабатывается без использования дополнительной памяти; б) корректируется скос оригинала, подавляется печатный растр и улучшается визуальное качество изображения; в) выполняется сегментация на области текста, картинок и фона; г) преобразованный результат сканирования сохраняется в метафайловый формат; на основе методики разработаны следующие новые режимы работы МФП: преобразование сканированных изображений в метафайловый формат с векторизацией символов текста; копирование двухсторонних карточек с автоматическим определением ориентации оригинала; сканирование нескольких оригиналов небольшого размера; сканирование книг.

3. Предложен подход и оригинальные технические решения для реализации в процессоре растровых изображений режима защиты напечатанных документов от копирования за счёт генерации «на лету» микросимволов и микроизображений, что отличает его от известных решений компании Xerox, а также режимов экономичной и черновой печати, режима печати скрытых цифровых водяных знаков.
4. Предложен подход для автоматической оценки и улучшения визуального качества печатаемых фотографий, который, в отличие от существующих методов, учитывает пространственное разрешение, размер фотокарточки и технологию печати; на основе данного подхода разработаны следующие новые автоматические способы обработки изображений: коррекции затемнённых участков изображения; детектирования и коррекции областей с эффектом «красных глаз»; оценки степени размытия фотографии и повышения резкости; подготовка для печати анаглифных изображений.
5. Предложена группа оригинальных преобразований для изменения размеров и соотношения сторон документов и фотографий без модификации основных смысловых элементов изображения, которая включает автоматические обрезку и переформатирование изображения за счёт удаления или добавления малозаметных участков, дополнения изображения симметрично отражёнными фрагментами; впервые сформулирован критерий заметности и предложен порядок применения преобразований.
6. На основе сформулированных принципов разработаны новые способы автоматического выбора изображений из коллекции и размещения фотографий на странице, при котором, в отличие от существующих алгоритмов размещения и упаковки, определяются коэффициенты масштабирования изображений; предложен оригинальный критерий оптимальности размещения, максимизирующий занимаемую на странице площадь и минимизирующий разницу в размере фотографий.

Теоретическая и практическая значимость: Теоретическая значимость работы заключается в развитии научно-методического аппарата разработки методов обработки изображений и новых режимов работы для систем сканирования и печати. Сформулированные положения и изложенные

практические решения могут использоваться при разработке новых функций МФП. Ряд результатов диссертационного исследования обобщается на методы обработки изображений в иных областях промышленности.

Для предлагаемых методов обработки изображений во многих странах мира получены патенты на изобретение, что подтверждает их новизну, практическую значимость и промышленную применимость. В исследовательском центре компании Samsung и научно-исследовательском центре компании Шлюмберже получены акты о внедрении результатов диссертационного исследования. Результаты работы применялись в прототипах и коммерческих моделях печатающих устройств Samsung, в настоящее время применяются в ряде моделей принтеров компании HP. Предложенные алгоритмы обработки фотографий были адаптированы для ПО смартфонов и SmartTV Samsung.

Методы исследования: В работе широко применялись методы цифровой обработки изображений, компьютерного зрения, системного анализа, оптимизации, распознавания образов, включая машинное обучение, а также методы математической статистики для обработки результатов экспериментов. При реализации алгоритмов в виде программного обеспечения использовались технологии параллельных и векторных вычислений.

Положения, выносимые на защиту. Итогом решения вышеуказанных научных и прикладных задач являются защищаемые положения, которые соответствуют полученным в диссертации результатам, обладающим научной новизной, теоретической и практической значимостью, а также промышленной применимостью:

1. Комплекс новых режимов работы информационных систем сканирования и печати, удовлетворяющий требованиям к качеству и производительности в условиях ограничений, накладываемых аппаратным обеспечением multifunctional принтеров. (п. 1 паспорта специальности 2.3.8)
2. Методология научно-исследовательской работы при создании технических и технологических решений для информационных систем сканирования и печати, включающая структуру и логическую организацию этапов исследования и разработки, направленная на минимизацию риска отсутствия внедрения результата исследования в продукт. (п. 1)
3. Методика режимов сканирования, включающая: сегментацию на фон, текст и картинки; устранение скоса; подавление печатного раstra; улучшение качества изображения; конвертацию в метафайловый формат, а также разработанные на основе этой методики режимы копирования двухсторонних карточек и сохранения сканированного документа в метафайл с векторизацией контуров символов. (п. 3)
4. Подход к реализации специальных режимов печати, таких как черновая, экономичная, защиты от копирования и добавления цифровых водяных знаков, за счёт локальной модификации кода процессора растровых изображений. (п.17)
5. Подход к оценке и улучшению качества печатаемых фотографий, учитывающий размеры бумажного отпечатка, разрешение и технологию печати, а также разработанные на основе данного подхода методы коррекции затемнённых

участков изображения, повышения резкости фотографий, коррекции изображений с эффектом «красных глаз». (п. 4)

Достоверность полученных результатов и рекомендаций подтверждается проведенными экспериментальными исследованиями, сравнением с существующими техническими решениями и результатами других исследователей, опытом промышленной эксплуатации разработанных методов, а также апробацией и обсуждениями результатов на всероссийских и международных конференциях, научно-технических семинарах, публикациями в рецензируемых научных изданиях.

Апробация работы: Основные результаты диссертации докладывались на 26 конференциях: IEEE 10th International Symposium on Consumer Electronics – Санкт-Петербург, 2006; 16th International Conference on Computer Graphics and Vision, Graphicon – Новосибирск, 2006; 17th International Conference on Computer Graphics and Vision, Graphicon – Москва, 2007; IS&T/SPIE Electronic Imaging – Сан-Хосе, США, 2008; 31-я конференция молодых ученых и специалистов ИППИ РАН Информационные технологии и системы, ИТиС – Геленджик, 2008; 18th International Conference on Computer Graphics and Vision, Graphicon – Москва, 2008; 9th International conference on Pattern recognition and Image Analysis: New information technologies, PRIA – Нижний Новгород, 2008, IS&T/SPIE Electronic Imaging – Сан-Хосе, США, 2009; 19th International Conference on Computer Graphics and Vision, Graphicon – Москва, 2009; Electronic Imaging – Сан-Хосе, США, 2010; IEEE International Conference on Pattern Recognition, ICPR – Стамбул, Турция, 2010; 20th International Conference on Computer Graphics and Vision, Graphicon – Санкт-Петербург, 2010; 12-я Международная конференция и выставка Цифровая обработка сигналов и ее применение, DSPA – Москва, 2010; 10th International conference on Pattern recognition and Image Analysis: New information technologies, PRIA – Санкт-Петербург, 2010; IS&T/SPIE Electronic Imaging – Сан-Франциско, США, 2011; 21th International Conference on Computer Graphics and Vision, Graphicon – Москва, 2011; 13-я Международная конференция и выставка Цифровая обработка сигналов и ее применение, DSPA – Москва, 2011; Международная конференция Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB – Харьков, 2011; IS&T/SPIE Electronic Imaging – Сан-Франциско, США, 2012; 22th International Conference on Computer Graphics and Vision, Graphicon – Москва, 2012; IS&T/SPIE Electronic Imaging – Сан-Франциско, США, 2013; IS&T/SPIE Electronic Imaging – Сан-Франциско, США, 2014; IS&T/SPIE Electronic Imaging – Сан-Франциско, США, 2015; Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС) – Зеленоград, 2016; 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO – Бар, Черногория, 2017; 5-я международная конференция Информационные технологии и нанотехнологии, ITNT, Самара, 2019.

Публикации: По теме диссертации опубликовано 84 работы, из них:

а) 50 квалификационных работ, опубликованных в соответствии с требованиями п.11 «Положения о присуждении ученых степеней»:

- 7 в рецензируемых журналах, индексируемых Scopus (Q2 и Q3), которые в соответствии с Рекомендацией ВАК от 21.12.2023 приравниваются к публикациям в рецензируемых изданиях категории K1 [3-9];
 - 1 в журнале из списка ВАК (K1) [10];
 - 42 патента на изобретение, выданные в Российской Федерации и США [43-84], которые приравниваются к публикациям в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК;
- б) 34 работы других видов:
- 2 рецензируемые монографии [1,2], изданные издательством Springer, главы индексируются Scopus;
 - 2 главы [11, 12] в книгах, главы которых индексируются Scopus;
 - 21 материалы международных конференций, индексируемые Scopus и/или Web of Science [13-33];
 - 9 доклады конференций [34-42].

Личный вклад автора: В диссертацию включены положения и результаты, полученные либо лично автором, либо под его непосредственным руководством и при определяющем участии. В работах, опубликованных в соавторстве, личный вклад соискателя состоит, по меньшей мере, в формулировке методики, методов, подходов, принципов и технических решений для обработки изображений в системах сканирования и печати.

Соответствие паспорту специальности: тема исследования и полученные результаты соответствуют направлениям, перечисленным в пунктах 1, 3, 4 и 17 паспорта специальности 2.3.8 – Информатика и информационные процессы.

Структура и объём диссертации: Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и приложения. Полный объём диссертации составляет 325 страниц, включая 107 рисунков, 38 таблиц. Библиография включает 359 источников.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель исследования и основные положения, выносимые на защиту, указаны научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, охарактеризована достоверность полученных результатов, приведены сведения об апробации, публикациях и внедрении результатов диссертационного исследования.

В **первой главе** вводится формальное математическое определение рассматриваемой предметной области, приведено краткое описание типов систем сканирования и печати, информационных процессов обработки данных в подобных системах, характеристик вычислительных платформ многофункциональных принтеров.

Отмечается, что в индустрии офисных устройств печати в соответствии с существующими стандартами качество оценивают по тестовым таблицам как путём измерения количественных показателей, так и на основе визуальной оценки. Сравнительную оценку качества осуществляют по результатам опроса группы из нескольких десятков пользователей в контролируемых условиях, используя

ранжирование или парное сравнение напечатанных изображений. Производительность печати, сканирования и копирования оценивают с помощью ряда параметров для заданного стандартами набора тестовых файлов/изображений. Время обработки изображений непосредственно влияет на производительность: чем меньше время обработки, тем выше производительность. В тексте диссертации, где упоминается производительность, или время, или скорость, имеется в виду время выхода первой копии документа (first set out time, FSOT).

В большинстве моделей МФП реализован только базовый функционал печати, сканирования и копирования, работающий единообразно вне зависимости от вида оригинала и назначения результата. В промышленности, государственных и образовательных учреждениях возникает необходимость модификации МФП путём разработки специальных режимов печати, сканирования и копирования, работа которых имеет специфику в зависимости от типа оригинала, требуемых результатов по качеству и размеру получающихся файлов. Часто требуется добавление новых функций в существующие системы сканирования и печати без изменения аппаратной части, а за счёт модификации системного и/или встроенного ПО.

В результате анализа объекта и предмета исследования вводится математическая формализация общей научной задачи диссертации. Общая научная задача – развитие научно-методического аппарата $\{M\}$ разработки и реализации методов обработки изображений для создания в системах сканирования и печати S комплекса новых и модернизированных режимов работы F , удовлетворяющих требованиям к производительности P и качеству Q , в условиях ограничений ресурсов R :

$$\{M\}: (S, R, F, P, Q) \rightarrow (F_a - F_b) > n, \quad (1)$$

где F_a – множество режимов S , включая новые разработанные, F_b – исходное множество режимов S , $F_b \subset F_a$;

при ограничениях:

- а. $\sum_{i=1}^{|F_a|} r_j(f_i) < r_j$, $r_j \in R$, где $r_j(f_i)$ – потребление j -го ресурса режимом $f_i \in F_a$, $i = 1..|F_a|$;
- б. $q_i \in Q$, $Q \subset Q_d$, где q_i – критерий качества работы f_i , Q_d – множество допустимых значений критериев качества;
- с. $p_i \geq p_{di}$, $p_i \in P$, $p_{di} \in P_d$, где p_i – производительность f_i , p_{di} – минимально допустимая производительность для f_i .

Заметим, что данная формулировка требует не ухудшить качество и производительность режимов F_b , которые существовали до внедрения комплекса новых режимов, а также подразумевает совместное использование ресурсов системы режимами. Элементами НМА $\{M\}$ являются методология научно-исследовательской работы при создании новых решений для систем сканирования и печати, методика реализации множества режимов сканирования, подходы к реализации специальных режимов печати и автоматического улучшения качества печатаемых фотографий, принципы автоматического выбора и размещения изображений на странице. Элементы $\{M\}$ формулируются в ходе решения частных

задач диссертационного исследования и подробно рассматриваются в последующих главах.

Во **второй главе** выполнен обзор существующих методологий выполнения НИР и проектов по разработке ПО. Для эффективного и успешного решения задач НИР требуется формализация структуры и организации данного рода деятельности. Таким образом, методология (учение о структуре, логической организации, методах и средствах деятельности) НИР при создании решений для систем сканирования и печати призвана упростить и ускорить разработку функционала МФП, обеспечить соответствие результата требованиям к производительности и качеству.

Будем считать НИР успешным, если его результаты были реализованы в каком-либо МФП или поставляемом с ним ПО. Такой критерий является довольно амбициозным, так как зачастую исполнители НИР не осведомлены обо всем многообразии факторов, которые влияют на принятие решения о реализации разработанных методов в продуктах. Ретроспективный анализ около 40 проектов НИР, выполненных за 3 года автором и его коллегами, позволил выявить факторы, которые воспрепятствовали реализации в продуктах их результатов. На стадии выполнения проекта эти факторы можно считать рисками, которые ещё не реализовались. Минимизация рисков повышает вероятность успешности НИР. Таким образом, целесообразно формулировать методологию НИР при разработке методов обработки изображений для систем сканирования и печати на основе анализа и управления рисками.

Выявленные риски можно разделить на четыре категории:

- связанные с вопросами интеллектуальной собственности;
- связанные с качеством работы;
- связанные с производительностью;
- связанные с реализацией на целевой вычислительной платформе.

Таблица 1 содержит риски НИР при создании решений для МФП, ранжированные с помощью метода анализа иерархий (МАИ, analytic hierarchy process, АНР), для каждого риска определён вес, характеризующий его относительную важность. По весу можно выделить 3 группы рисков: ρ_1 - ρ_2 ведут к отказу от реализации результатов НИР; ρ_3 - ρ_5 ведут либо к отказу от реализации, либо принятие решения будет отложено; ρ_6 - ρ_{10} вероятно повлекут задержку с реализацией на несколько месяцев.

Предлагается основанная на анализе и управлении рисками методология НИР при создании решений для МФП [10]. Базовая идея похожа на спиральную методологию разработки ПО, но содержание этапов отличается. Схема методологии приведена на рисунке 1. Методология НИР подразумевает, что последовательность этапов делает три витка, переходя от определения задач, ограничений и альтернатив к анализу рисков, а затем к разработке. Однако, если при оценке риска выясняется, что он достаточно высок, то возможно полное либо частичное повторение предыдущего витка, при условии, что это не противоречит срокам выполнения НИР.

Таблица 1. Риски НИР при создании решений для МФП, ранжированные с помощью МАИ

Обозначение	Риск	Вес
р1	Функция непривлекательна для пользователей	0,190
р2	Нарушается чужая интеллектуальная собственность	0,182
р3	Невозможно реализовать на целевой платформе	0,141
р4	Неудовлетворительное качество по оценкам пользователей	0,139
р5	Ухудшаются показатели производительности	0,138
р6	Используется ПО с неподходящей лицензией	0,059
р7	Высокие затраты на реализацию в продукте	0,045
р8	Качество хуже, чем у конкурентов	0,045
р9	Длительные сроки реализации в продукте	0,039
р10	Вопрос защиты интеллектуальной собственности не решен	0,020



Рисунок 1. – Схема методологии НИР при создании решений для МФП.

Проект начинается с поиска идеи для новой функции для систем сканирования и печати. На данном этапе изучается продукция конкурентов, анализируются задачи, возникающие у различных групп пользователей,

рассматриваются возможные альтернативы. Далее создается чрезвычайно упрощённый макет продукта, чтобы подтвердить или опровергнуть гипотезу, что пользователи будут использовать продукт в данном виде. Затем выполняется переход к поиску и анализу патентной информации по данной теме. Заключительным этапом первого витка спирали является выбор критериев оценки качества разрабатываемого метода, подготовка тестовых данных и формулировка задачи исследования. Критерии должны быть количественными, для качественных критериев необходимо предложить способ преобразования их в количественные. Предпочтительно использовать тестовые данные критерии, соответствующие стандартам, используемым в индустрии сканирования и печати.

Второй виток спирали начинается с обзора литературы и решений конкурентов по выбранной теме. Далее подход, который рассматривается как наиболее перспективный применяется для разработки алгоритма и первого прототипа ПО. Как правило, первый прототип программы разрабатывается с помощью высокоуровневых средств, например, MATLAB или пакетов языка Python. На следующем этапе путём тестирования первого прототипа выполняется оценка качества работы разработанного метода. Время обработки на данном этапе не оценивается. Далее выполняется идентификация этапов в конвейере печати или сканирования, подходящих для реализации данного метода. Данный поиск альтернатив предназначен для определения запасных вариантов реализации метода в том случае, если реализация метода на целевой платформе окажется невозможна, или производительность на ней будет низкой, или стоимость или время реализации окажутся высокими.

Одним из результатов этапа идентификации возможных мест для реализации метода являются требования ко второму прототипу ПО, который реализуется на C/C++ с учётом возможностей и ограничений рассматриваемых вычислительных платформ. Далее выполняется анализ лицензий используемых библиотек и оценка качества и времени работы для второго прототипа. Если сформулированные на первом витке критерии удовлетворены, то осуществляется переход к анализу подходов к защите разработанного метода как объекта интеллектуальной собственности. Завершают третий виток анализ требований к документированию и оформлению кода.

Методы обработки изображений, описанные в диссертации, разработаны в соответствии с предложенной методологией. Выполнение НИР на основе данной методологии привело к увеличению в три раза количества результатов исследований, которые были реализованы в системном или встроенном ПО МФП.

В третьей главе описана методика режимов сканирования. Многие современные МФП имеют несколько режимов сканирования и копирования, которые различаются по типу сканируемых оригиналов или по способу сохранения информации. Обычно эти режимы реализуют во встроенном ПО МФП. Целесообразно не вести разработку каждого режима с нуля, а обобщить и формализовать приёмы решения подобных задач, т.е. выработать методику – «совокупность методов, приёмов практического выполнения чего-либо», которая

рекомендует комплекс методов обработки сканированных изображений и последовательность их применения.

К методике предъявляются следующие требования:

1. комплекс методов должен включать коррекцию типичных искажений сканированных изображений, а также артефактов, возникающих при сохранении сканированной информации;
2. последовательность обработки должна быть гибко настраиваемой в зависимости от особенностей каждого режима;
3. обработка должна быть достаточно быстрой, чтобы удовлетворять требованиям к производительности;
4. методы обработки должны функционировать в условиях ограничений аппаратных платформ МФП.

Предлагаемая методика включает [2, 44]:

- предварительную оценку параметров обработки по изображению, сканированному с низким разрешением (как правило, 75 dpi), а затем сканирование с заданным пользователем разрешением и обработка, которая осуществляется без использования дополнительной памяти (*in-place*);
- устранение основных искажений сканированных изображений: скоса, размытия, печатного растра, потери контраста;
- проведение сегментации, необходимой для сохранения изображения в метафайл в соответствии с концепцией модели смешанного растрового содержимого (MRC), т.е. текст, картинки и фон сохраняются отдельно.

Рекомендуемая последовательность этапов обработки для режимов сканирования показана на рисунке 2. Методика является гибкой, в зависимости от задач и ограничений конкретного режима сканирования допускается исключение отдельных этапов. Если аппаратные возможности МФП позволяют, то методика допускает сканирование сразу в заданном разрешении и получения изображения низкого разрешения путём децимации сканированного.

Целями обработки изображения низкого разрешения являются: определение положения оригинала на стекле сканера; определение угла скоса; сегментация на области фона, текста и картинок; оценка параметров в соответствии с конкретным режимом сканирования. После сканирования изображения заданного разрешения сначала, если скос обнаружен, выполняется его коррекция. Затем подавляется печатный растр. Далее выполняются операции по повышению качества изображения, в частности, повышается глобальный и локальный контраст. Следующим этапом является обработка в соответствии с конкретным режимом сканирования. На заключительном этапе результат обработки записывается в метафайл, причём способ записи зависит от режима сканирования и выполняется в соответствии с концепцией модели смешанного растрового содержимого.

Методика режимов сканирования была применена при разработке следующих режимов:

- преобразования сканированного изображения в PDF с векторизацией контуров символов [29, 80, 83, 84];

- копирования двухсторонних карточек на одну страницу с исправлением скоса и обеспечением идентичной ориентацией обеих сторон, где ориентация определяется с помощью детектирования на изображении в различной ориентации цифр не инвариантных к повороту; для 99 % карточек, стороны которых развёрнуты относительно друг друга на 180 градусов, ориентация определяется и исправляется [26, 67-69];
- сканирования оригиналов маленького размера, таких как чеки, посадочные талоны и т.п.; оригиналы сегментируются, для них исправляется скос и улучшается качество, после чего они сохраняются в отдельные документы или, наоборот, оригиналы из нескольких сканов могут быть компактно расположены на странице [30, 75, 76];
- сканирования книг с исправлением яркостных и геометрических искажений в районе корешка [2, 45, 46].



Рисунок 2. – Последовательность этапов обработки для режимов сканирования.

Предложенная методика позволяет использовать различные методы для каждого из этапов обработки, например, разные подходы для сегментации

изображений, но важно, чтобы они удовлетворяли ограничениям вычислительной платформы и критериям качества. Для разработки режимов сканирования и копирования были предложены следующие новые методы обработки изображений:

- быстрый способ оценки угла скоса за счет анализа расстояний по столбцу от верхнего и нижнего края ограничивающей рамки до первого пикселя не относящегося к фону; коррекции скоса выполняется без использования дополнительной оперативной памяти за счет декомпозиции поворота на два сдвига [27];
- способ восходящей сегментации на области текста, рисунков и фона, где изображение разбивается на блоки и для классификации каждого блока на основе текстурных признаков используются классификаторы AdaBoost в схеме «один против всех», классификаторы возвращают уровни уверенности, которые усредняются по соседним блокам, после чего с помощью голосования принимается решение о классе блока, на финальном этапе соседние блоки объединяются в области [6, 8, 12, 38-40, 62];
- повышения локального и глобального контраста за счет адаптивной регулировки вида сигмоидной функции преобразования уровней на основе анализа локальных и глобальной гистограмм яркости [31, 32, 82];
- подавления печатного раstra [1, 22, 64, 65].

Для примера в автореферате приводится описание метода подавления печатного раstra. Для создания иллюзии присутствия большого количества оттенков цветов при печати с помощью лазерных, светодиодных и струйных принтеров используют печатный растр, состоящий из ячеек полутонирования (halftone). Аналогичный подход используется и в типографской печати. Растр применяется не только для печати картинок, но и для текста и элементов графики, цвета которых отличаются от максимально насыщенных красок. При сканировании линейкой датчиков сканера регулярной решётки раstra в результате биения их периодов возможно возникновение муарового узора (муара). При последующей печати сканированного изображения возможно биение периодов двух решёток раstra, что также приведёт к муару. Кроме того, после сканирования предпочтительнее иметь изображение с большим количеством оттенков вместо изображения, состоящего из точек нескольких цветов, т.е. требуется преобразование печатного раstra в непрерывное изменение оттенков (contone). Подобные операции называют подавлением печатного раstra (descreen), или обратным полутонированием (inverse halftoning), или подавлением муара.

На основе анализа существующих алгоритмов сделан вывод, что с учетом того, что способ подавления раstra должен работать во встроенном ПО МФП в автоматическом режиме без настроек пользователя как для изображений чёрно-белой, так и цветной печати, целесообразно реализовать его в виде адаптивного сглаживающего фильтра, степень размытия которого различается для похожих и непохожих друг на друга соседних блоков изображения. Поскольку в результате применения сглаживающих фильтров подавляется не только печатный растр, но и размываются контурные перепады яркости (границы), а также уменьшается контраст изображения, то требуется коррекция размытия и повышение контраста.

При сканировании растрованное изображение немного размывается. Это отрицательно влияет на определение степени похожести блоков в фильтре адаптивного сглаживания. Поэтому на первом этапе выполняется повышение резкости за счёт уменьшения длины перепада яркости. Для этого сканированное цветное изображение $I = \{I_R, I_G, I_B\}$, конвертируется в полутоновое I_I . Квадратное окно размера N_o на N_o с центром в пикселе с координатами (r, c) перемещается по всем пикселям изображения I_I . Для каждого положения окна, обозначаемого Ω , вычисляются T_1 – среднее значение яркости пикселей меньше первого квартиля распределения яркостей пикселей в окне и T_2 – среднее значение яркости пикселей больше третьего квартиля распределения яркостей пикселей в окне:

$$z_1 = \min \left(z \mid \sum_{k=0}^z h'_{\Omega}(k) \geq 0,25 \right), z_2 = \max \left(z \mid \sum_{k=z}^{2^{D_I}-1} h'_{\Omega}(k) \geq 0,25 \right), \quad (2)$$

$$T_1 = \sum_{k=0}^{z_1} k h'_{\Omega}(k), T_2 = \sum_{k=z_2}^{2^{D_I}-1} k h'_{\Omega}(k), \quad (3)$$

где h'_{Ω} – нормализованная гистограмма яркости в окне; D_I – глубина цвета на канал.

В области контурного перепада T_1 соответствует уровню яркости с одной стороны от перепада, а T_2 – уровню с другой стороны. Яркость пикселя в области контурного перепада $I_I(r, c)$ преобразуются с помощью сигмоидной функции преобразования уровней $s(x)$, где $x \in [0, 1]$:

$$s(x) = \frac{x^2}{x^2 + (1 - x)^2}, \quad (4)$$

Предварительно $I_I(r, c)$ нормализуется в диапазон $[0, 1]$ с помощью функции $f(x)$:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < T_1, \\ \frac{x - T_1}{T_2 - T_1}, & x \in [T_1, T_2], \\ 1, & x > T_2, \end{cases} \quad (5)$$

В равномерной области разность $T_2 - T_1$ не велика (меньше порога T_n), в этом случае значение яркости пикселя с координатами (r, c) не изменяется:

$$I'_I(r, c) = \begin{cases} I_I(r, c), & T_2 - T_1 < T_n, \\ T_1 + s(f(I_I(r, c)))(T_2 - T_1), & \text{иначе.} \end{cases} \quad (6)$$

В результате преобразования по формуле (6) контурные перепады на I'_I становятся более крутыми, длина перепадов сокращается, изображение выглядит более резким чем I_I . Однако, для некоторых изображений заметен эффект постеризации (cartoon). Подавление этого эффекта достигается за счёт взвешенного суммирования $I'_I(r, c)$ с исходным $I_I(r, c)$:

$$I''_I(r, c) = I_I(r, c)(1 - g(T_2 - T_1)) + I'_I(r, c)g(T_2 - T_1), \quad (7)$$

$$g(x) = 1 - e^{-\frac{5(x-T_n)}{2^{D_l}}}. \quad (8)$$

Цветовой канал I''_R получают как:

$$I''_R(r, c) = \begin{cases} \frac{I_R(r, c)I''_I(r, c)}{I_I(r, c)}, & I_I(r, c) \neq 0, \\ I_R(r, c), & \text{иначе.} \end{cases} \quad (9)$$

Цветовые каналы I''_G и I''_B вычисляются аналогичным образом. Преобразование (9) позволяет избежать изменения насыщенности цветного изображения.

На втором шаге способа подавления печатного растра применяется алгоритм адаптивного сглаживания, в котором квадратное окно размера N_w на N_w с центром в пикселе с координатами (r, c) перемещается по всем пикселям цветного изображения $I = \{I_R, I_G, I_B\}$, для каждого (r, c) вычисляется разница $S(r, c)$ между блоком размера N_b на N_b с центром в пикселе с координатами (r, c) и блоком такого же размера с центром в пикселе с координатами $(r + u, c + v)$ причем значения u и v есть псевдослучайные числа в диапазоне $[-N_w/2, N_w/2]$, $u \neq 0, v \neq 0$:

$$S(r, c) = \sum_{i=-\frac{N_b}{2}}^{\frac{N_b}{2}} \sum_{j=-\frac{N_b}{2}}^{\frac{N_b}{2}} (I_R(r + i, c + j) - I_R(r + u + i, c + v + j))^2 + \\ + (I_G(r + i, c + j) - I_G(r + u + i, c + v + j))^2 + \\ + (I_B(r + i, c + j) - I_B(r + u + i, c + v + j))^2. \quad (10)$$

Если разница $S(r, c)$ невелика (меньше порога T_s), то предполагается, что пиксель с координатами (r, c) находится на однородной пространственно повторяющейся текстуре, образованной печатным растром, и результат сглаживания в данном пикселе $I'(r, c)$ равен $I_{\sigma_s}^*(r, c)$ – результату гауссова размытия с дисперсией σ_s . $I_{\sigma_s}^*(r, c)$ получается с помощью свёртки каждого канала цветного изображения с одинаковым ядром в виде двумерного гауссиана. Если разница $S(r, c)$, больше порога T_s , то предполагается, что пиксель с координатами (r, c) находится в области заметного изменения текстуры, образованной печатным растром, и результат сглаживания в данном пикселе $I'(r, c)$ равен $I_{\sigma_m}^*(r, c)$ – результату гауссова размытия с дисперсией σ_m . Причем $\sigma_s > \sigma_m$, т.е. области однородных текстур размываются сильнее, чем области, где происходит резкое изменение вида текстуры растра, что предположительно соответствует границам на исходном изображении до растрирования.

Далее необходимо повысить резкость сглаженного изображения. Сначала выполняется повышение резкости за счёт уменьшения длины перепада яркости (формулы (2)-(9)). Затем резкость повышается с помощью увеличения высоты контурного перепада. Одним из наиболее известных алгоритмов такого типа является фильтр нерезкого маскирования, в котором к изображению добавляется умноженная на коэффициент k разность изображения и его размытой фильтром

Гаусса копии. Для ряда сочетаний дисперсии фильтра Гаусса и k возможно возникновение видимых искажений в виде ореолов (так называемый, эффект «гало») вдоль контурных перепадов. Предлагается подход, позволяющий избежать возникновения ореолов за счёт использования вместо фильтра Гаусса модифицированного билатерального фильтра:

$$I'_I(r, c) = \frac{\sum_{i=-\frac{N_o}{2}}^{\frac{N_o}{2}} \sum_{j=-\frac{N_o}{2}}^{\frac{N_o}{2}} I_I(r, c) \Phi(I_I(r, c) - I_I(r + i, c + j))}{N_o^2 \sum_{i=-\frac{N_o}{2}}^{\frac{N_o}{2}} \sum_{j=-\frac{N_o}{2}}^{\frac{N_o}{2}} \Phi(I_I(r, c) - I_I(r + i, c + j))}, \quad (11)$$

где N_o – размер окна; $\Phi(x)$ - весовая функция по диапазону яркостей, $\Phi(x)$ похожа на гауссиан, но с увеличением $|x|$ уменьшается более плавно при значении параметра μ больше двух:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left| \frac{x^2}{\sigma_r^2} \right|^\mu}}. \quad (12)$$

Фильтр нерезкого маскирования с использованием модифицированного билатерального фильтра:

$$I''_I(r, c) = \begin{cases} I_I(r, c), & |I_I(r, c) - I'_I(r, c)| < T_n, \\ I_I(r, c) + k(I_I(r, c) - I'_I(r, c)), & \text{иначе.} \end{cases} \quad (13)$$

Качество разработанного способа подавления растра по сравнению с альтернативными алгоритмами и ПО оценивалось на основе показателей, вычисляемых по тестовой таблице (см. рисунок 3), а также на основе опроса пользователей. Сравнение выполняется для ПО Descreen и SilverFast HDR, а также алгоритма hardware-friendly descreen (HFD).

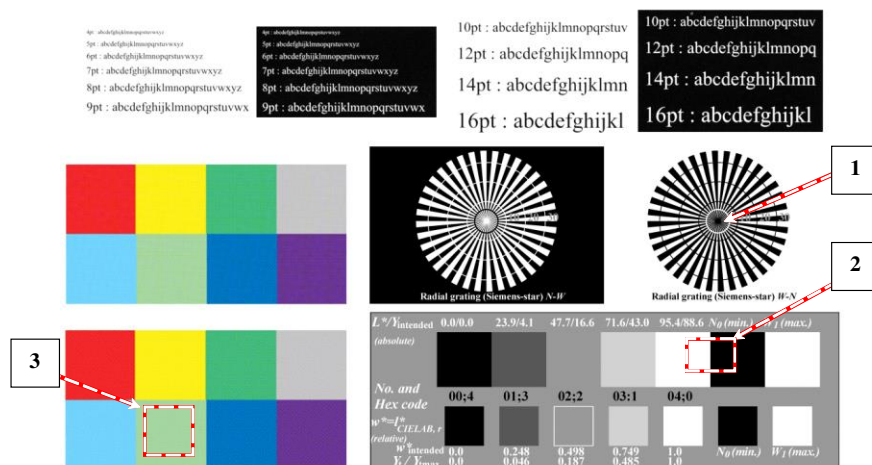


Рисунок 3. – Тестовая таблица с обозначением областей, используемых для количественного сравнения способов подавления печатного растра.

Радиальные миры в области 1 (так называемые Siemens star) используются для оценки степени размытия высокочастотных структур в ходе подавления растра.

Оценка резкости контурного перепада между контрастными областями с чёрно-белым растром выполняется для области 2. Оценка искажения цветов в результате работы способа осуществляется в области цветного растра 3. Тестовая таблица отсканирована с разрешением 600 dpi и глубиной цвета 24 bpr, затем обработана различными способами подавления печатного растра.

В таблице 2 приведены значения увеличения диаметра круга, в котором неразличимы линии радиальной миры, по сравнению с необработанным сканированным изображением. Предлагаемый способ сохраняет высокочастотные чёрно-белые детали незначительно хуже, чем Descreen и HFD. Заметим, что увеличение диаметра составляет лишь около половины мм, что практически незаметно невооруженным глазом. Длина перепада между квадратными участками чёрно-белого растра приведена в таблице 3. Вычисляются средние значения яркости светло-серой и тёмно-серой областей, между которыми есть контурный перепад. Усредняются значения яркости в столбцах, в результате чего получается усреднённый профиль яркости. На профиле краем перепада считаются ближайшие точки, значения яркости которых более чем на 10 градаций яркости отличаются от средних яркостей светло-серой и тёмно-серой областей. Длина перепада — это абсолютная разность между координатами краёв перепада. Предлагаемый способ обеспечивает границу между областями даже более резкую чем на исходном сканированном изображении. Значения пикселей области 3 исходного сканированного и обработанного изображений конвертировано в цветовое пространство HSV, затем для каждого канала обоих изображений вычислено среднее значение. Результаты поканальной разности средних значений исходного и обработанного изображений приведены в таблице 4. В отличие от альтернативных решений у предлагаемого способа подавления печатного растра практически отсутствует искажение цвета.

Таблица 2. Увеличение диаметра круга в пикселях в области 1 (см. рисунок 3), в котором неразличимы линии радиальной миры

Элемент	Descreen	HFD	SilverFast	Предлагаемый
Black star	8	9	54	13
White star	6	8	49	11

Таблица 3. Оценка резкости границы в области 2 (см. рисунок 3)

Параметр	Исходное	Descreen	HFD	SilverFast	Предлагаемый
Длина перепада, пикс.	6	6	6	9	4

Таблица 4. Оценка искажений цвета в области 3 (см. рисунок 3).

Параметр	Descreen	HFD	SilverFast	Предлагаемый
$\overline{\Delta H}$	1	-12	9	-1
$\overline{\Delta S}$	-3	-3	12	0
$\overline{\Delta V}$	-4	-4	0	3

Для сравнительной оценки качества способов подавления печатного растра три журнальные страницы, напечатанные типографским способом с

использованием четырёхкрасочной печати, отсканированы с разрешением 600 dpi. Далее различными методами на изображениях подавлялся растр, затем обработанные изображения были напечатаны на одинаковой бумаге. Помимо обработанных изображений были напечатаны исходные. Особенностью изображений является присутствие как текста, причем не только чёрного цвета, так и картинок. В опросе в контролируемых условиях участвовало 30 человек, которые были проинструктированы для каждого из трёх изображений ранжировать пять напечатанных страниц в порядке убывания качества. Интервьюируемые не знали способ обработки. Самое качественное изображение получало оценку E в 5 баллов, следующее 4, и так далее до 1. Таблица 5 содержит оценки \bar{E} , усреднённые по всем участвовавшим в опросе, для каждого из трёх рассматриваемых изображений. Предложенный способ имеет самые высокие оценки. Участвовавшими в опросе было отмечено, что он обеспечивает наиболее четкий текст без пятен и артефактов на символах текста.

Таблица 5. Средние оценки пользователей для тестовых изображений.

Способ	\bar{E} для изображения а	\bar{E} для изображения b	\bar{E} для изображения с
Исходный скан	1,3	2,2	1,5
Descscreen	3,9	4,2	3,3
HFD	2,2	1,9	1,8
SilverFast HDR	3,0	1,9	3,6
Предлагаемый	4,6	4,8	4,8

В качестве примера режима сканирования рассмотрим режим преобразования сканированного изображения в PDF с векторизацией контуров символов. Обычно при сохранении в метафайл изображения текста, картинок и фона сохраняются отдельно. Для уменьшения размера файла текст и картинки сжимаются. В результате качество текста деградирует: форма и цвет символов изменяются, что особенно заметно при повторной печати. При оптическом распознавании символов для сканированного изображения такой копии возникает заметно больше ошибок по сравнению с оригиналом. Для преодоления этих недостатков предложено сохранять в PDF символы текста в виде заполненных путей (path) – последовательности отрезков прямых и кубических кривых Безье.

Кратко рассмотрим обработку областей текста, полученных в результате сегментации. На бинарном изображении определяются связные области символов текста, и для каждой области выполняются следующие шаги:

1. оценка цвета символа по сканированному цветному изображению;
2. масштабирование связной области сканированного цветного изображения в предопределённый размер;
3. бинаризация масштабированного изображения;
4. определение пикселей внешнего и внутренних контуров;
5. аппроксимация пикселей контуров полигонами, где при аппроксимации решается задача минимизации количества вершин полигона при заданных величинах максимального и суммарного отклонения евклидова расстояния от пикселей контура до полигона, регулировка величин отклонений позволяет

искать компромисс между размером PDF файла, который зависит от количества вершин полигонов, и качеством аппроксимации контуров.

6. преобразование полигонов в пути из отрезков прямых и кубических кривых Безье, путь вместе с оператором заливки цветом, определённым на шаге 1, записывается в PDF.

Рисунок 4 иллюстрирует шаги обработки при векторизации контура «k».

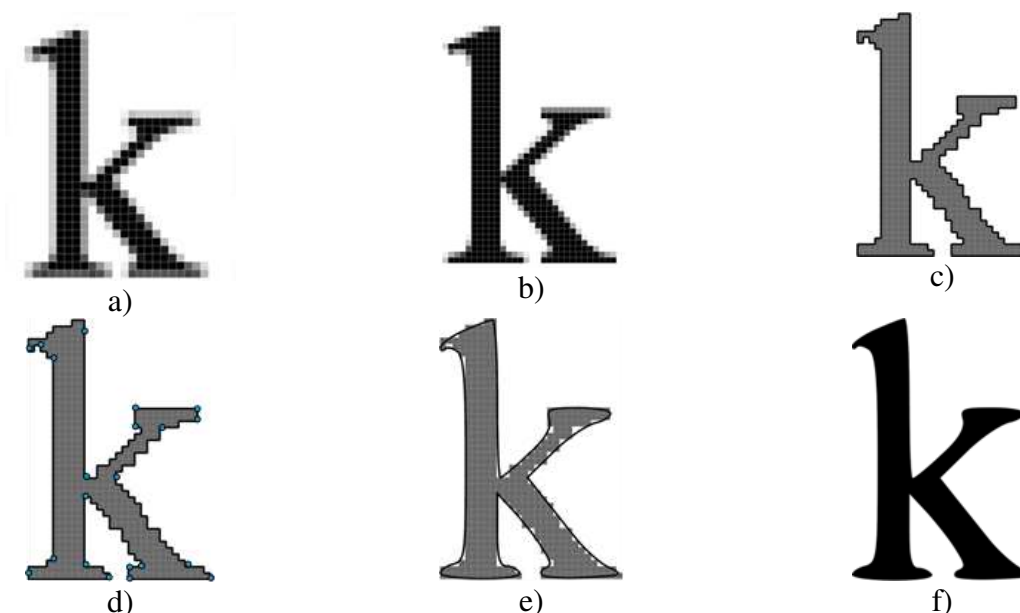


Рисунок 4. – Иллюстрация шагов обработки изображения символа: а) фрагмент сканированного изображения; б) масштабированный фрагмент; с) нахождение пикселей контура; д) аппроксимация контура полигоном; е) преобразование полигонов в пути; ф) путь, залитый цветом символа.

В таблице 6 приведены размеры PDF файлов при сходном визуальном качестве напечатанного текста. При сохранении текстовых областей и картинок в виде изображений, сжатых без потерь информации (способ сжатия deflate) размер файлов самый большой. При сжатии с потерей информации (JPEG) для обеспечения приемлемого качества изображения текста не может быть выбрана высокая степень сжатия, получающиеся размеры файлов также велики. При векторизации контуров символов текста достигается наименьший размер файлов.

Таблица 6. Размер PDF файла для различных способов сохранения при сходном визуальном качестве напечатанного текста

Способ сохранения	Размер файла, kb	
	Только текст	Текст и картинки
Растровое изображение, сжатое без потерь	3882	11027
Растровое изображение, сжатое с потерей	1257	1490
Предлагаемый	538	625

Оценка цвета символов и заливка всего тела символа одинаковым цветом позволяют избежать цветовых искажений. Во-первых, цветной и серый текст в силу использования печатного растра на сканированном изображении является смесью

пикселей разных цветов и оттенков. В результате подавления печатного раstra пиксели символов принимают близкие значения, но возможны вариации на краях символов. Во-вторых, при сохранении чёрного текста в виде цветного изображения с JPEG сжатием на краях символов образуется цветная каёмка. На рисунке 5 показаны увеличенные цветной и чёрный символы, сохраненные в PDF с JPEG сжатием. Неравномерный цвет по телу символа при повторной печати ведёт к ухудшению его читаемости. Сохранение символов предложенным способом позволяет избежать искажений цвета. На рисунке 5 можно заметить, что форма букв немного искажается, но это не является ограничением предложенного алгоритма векторизации, а есть следствие установки на шаге 5 таких параметров (максимального и суммарного отклонения евклидова расстояния от пикселей контура до полигона), которые обеспечивают размер PDF файла в заданном диапазоне. Уменьшение величин отклонений позволяет получить контур, повторяющий форму символов с незаметными невооруженным глазом отличиями.



Рисунок 5 – Цвет символов в PDF в зависимости от способа сохранения: а) цветной символ, сжатый JPEG; б) цветной символ в виде залитого цветом контура; в) чёрный символ, сжатый JPEG; г) чёрный символ в виде залитого цветом контура.

Важным показателем качества работы данного режима сканирования является точность распознавания символов для повторных копий документа, когда документ сканируется, затем преобразуется в PDF, снова печатается и так несколько раз. В таблице 7 приведено сравнение по количеству ошибок распознавания для предлагаемого способа и для сохранения в PDF растрового изображения, сжатого с помощью JPEG. Размеры файлов приблизительно одинаковы. Количество ошибок для предлагаемого способа значительно меньше, и резкий рост их числа начинается только с третьей копии.

Таблица 7. Отношение числа ошибочно распознанных и нераспознанных символов к общему количеству символов

Способ сохранения	Скан оригинала	1-я копия	2-я копия	3-я копия
Изображение, сжатое JPEG	0,002	0,007	0,104	0,251
Предлагаемый		0,002	0,015	0,084

В четвёртой главе рассматривается подход для реализации специальных режимов печати, предназначенных для экономии расходных материалов и добавления в напечатанный документ защитных элементов. При модификации встроенного ПО объём добавляемого кода ограничен размером доступного

пространства в используемой флеш-памяти. Влияние нового кода на существующий должно быть минимизировано, чтобы не внести ошибки в имеющиеся функции и не ухудшить характеристики производительности.

Сформулирован подход, удовлетворяющий требованиям и ограничениям и при котором выполняется лишь локальная модификация кода процессора растровых изображений (RIP):

- определить в существующем коде такие несколько мест, где за счёт ветвления можно выполнить переход на процедуру реализации специального режима, а затем вернуться к основной последовательности обработки;
- выбрать вычислительно простой алгоритм, имеющий компактную реализацию для используемой встроенной платформы;
- при реализации переиспользовать существующие в коде RIP функции.



Рисунок 6 – Схема работы RIP с указанием модулей для передачи управления в специальные режимы печати.

Высокоуровневая схема работы RIP показана на рисунке 6. На вход RIP поступает метафайл с графическими элементами для формирования изображения страницы. RIP выполняет три блока операций: интерпретация формата метафайла, извлечение графических и управляющих записей; рендеринг графических

элементов в координатах печатаемого изображения; преобразование изображения в печатный растр. На рисунке 6 цифрами обозначены три модуля, в которых целесообразно выполнить передачу управления на функции специальных режимов печати.

Без ограничения общности предложенный подход применён при создании новых специальных режимов печати для лазерного принтера с RIP, предназначенном для печати метафайлов на языке Postscript. В результате локальной модификации модуля растеризации символов (1 на рис. 6) реализованы:

- режим экономичной печати текста, в котором предлагается уменьшить количество печатаемых точек во внутренних областях символов путём переключения точек растрированного символа, положение точек выбирается случайным образом, но зависит от ранее переключенных, режим позволяет сократить использование краски примерно на 13 % и обеспечивает более высокое визуальное качество символов по сравнению с существующими способами экономичной печати [25, 66];
- режим защиты от копирования за счёт генерации микросимволов и печати микротекста, где для специальным образом растрированного изображения символа строится его скелет, который дополнительно обрабатывается для обеспечения печати линий толщиной в одну точку [58–61].

Рисунок 7 демонстрирует искажения микротекста при копировании. На напечатанном оригинале тест различим (см. 7a), а на копии (см. 7b) полностью исказился. Высота символов микротекста на рисунке 7 составляет 250 мкм. Качество печати микротекста сравнимо с результатом печати шрифтом Xerox MicroText Specialty Imaging Fonts, хотя шрифт Xerox специально спроектирован для микропечати ограниченного набора символов, а в предлагаемом способе битовые карты с микросимволами генерируются «на лету» для букв различных языков. Реализованный во встроенном ПО режим микропечати оказывает незначительное влияние на время печати по сравнению с обычным режимом: добавление к странице текста (2000 символов, размер шрифта 12 пунктов) 100 символов микротекста увеличивает время печати менее чем на 0,01 с.

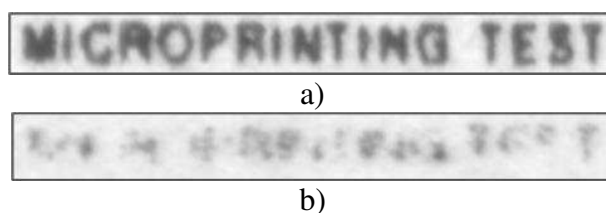


Рисунок 7 – Иллюстрация искажения микротекста при копировании: а) микротекст на оригинале; б) микротекст на копии.

Путём модификации модуля декодирования последовательности пикселей растровых изображений (2 на рис. 6) созданы:

- режим черновой печати, в котором картинки преобразуются в цветные эскизы, получаемые путём альфа-смешения картинки с результатом её обработки фильтром разность гауссиан, при использовании режима экономится до 80 %

тонера, а время работы режима превышает время обычной печати лишь на 0,5 % [28, 72–74, 78–79];

- режим защиты от копирования с помощью генерации микроизображений [2].

Добавление обработки на выходе блока преобразования в печатный растр (3 на рис. 6) позволило реализовать режимы встраивания скрытых цифровых водяных знаков (ЦВЗ) в печатаемый документ, скрытая информация печатается на странице в виде дублируемых шаблонов, состоящих из незаметных невооружённым глазом точек (желтых при цветной печати и черных при черно-белой) [5, 70–71].

В пятой главе представлен подход к оценке и улучшению качества печатаемых фотографий, а также разработанные на его основе методы. Миллионы фотографий снимаются ежедневно цифровыми фотокамерами и камерами смартфонов. Большинство фотографий остаётся в электронном виде, публикуется в облачных сервисах или распространяется в социальных сетях. Тем не менее, есть пользователи, которые печатают фотографии на фотопринтерах или универсальных цветных МФП. Файлы с фотографиями часто поступают в принтер непосредственно с камеры по проводному или беспроводному интерфейсу или считываются с карт памяти. Поэтому способы оценки и улучшения качества изображения необходимо реализовать во встроенном ПО устройств печати. Вычислительные платформы устройств печати обладают скудными ресурсами, а время на подготовку фотографии к печати, включая коррекцию, не должно превышать нескольких секунд, что требует разработки вычислительно простых методов.

Большинство известных способов оценки и коррекции качества фотографий ориентированы на их просмотр на дисплее, а не на бумажном отпечатке. Сформулирован подход к оценке и улучшению качества фотографий, учитывающий то, как выглядят напечатанные изображения, и позволяющий достичь высокой скорости обработки на целевой встроенной платформе:

1. Учитывать детали изображения, видимые для данного размера фотокарточки, разрешения и технологии печати.
2. Выполнять оценку характерных дефектов фотографий на основе машинного обучения по визуальным данным изображений и метаданным [35, 43, 63].
3. Выполнять обработку в цветовом пространстве входных данных без конвертации в промежуточные представления.

На основе предложенного подхода разработаны следующие новые методы обработки изображений:

- методы предотвращения печати размытых фотографий и повышения резкости печатаемого изображения, где оценка резкости получается из уровня уверенности классификатора AdaBoost, обученного детектировать нерезкие изображения на основе признаков, получаемых из зависимости энтропии гистограммы изображения после применения фильтра высоких частот (ФВЧ) от размера ядра ФВЧ [18, 54–55];
- способы детектирования и коррекции эффекта «красных глаз», где детектирование происходит с помощью каскада классификаторов, один из которых обучен с помощью метода AdaBoost, высокое качество детектирования

обеспечивает уникальный набор признаков и оригинальный критерий качества детектирования [15, 17, 51–53];

- способ печати анаглифных изображений из стереопары [11, 41, 77], где 3D эффект достигается за счёт цветового кодирования изображений, предназначенных для левого и правого глаза, и использования очков с двумя разными цветными фильтрами;
- метод оценки и улучшения затемнённых областей на фотографиях, снятых в контрольном свете [13–14, 33, 47–50].

Рассмотрим метод оценки и улучшения на фотографиях затемнённых областей. В случае съёмки с контрольным освещением общий контраст изображения, как правило, высокий, но часть фотографии имеет тёмные оттенки и низкий контраст. В англоязычной литературе коррекция такого рода дефекта получила название *shadow enhancement* – улучшение затемнённых/затемнённых областей или *backlit image enhancement* – улучшение изображений с задней засветкой. На первом этапе требуется проверить по метаданной фотографии, что при съёмке не применялась вспышка, затем выполнить масштабирование изображения, исходя из разрешения печати и размера отпечатка.

Из проведённого анализа существующих способов коррекции затемнённых областей сделан вывод, что целесообразно использовать модель формирования изображения I как произведения диффузной отражательной способности R и освещённости сцены L . Пусть есть альфа-канал α_s , значения которого близки к 1 в светлых областях и к 0 в тёмных. Тогда повысить яркость и контраст в затемнённых областях канала яркости I можно путём смешивания с α_s исходного I и оценки отражательной способности I_a . Однако, в I_a отсутствует освещённость сцены, такое изображение выглядит неестественно. Поэтому предпочтительно смешать I_a с исходным каналом яркости I . Для нормализованного в диапазон от 0 до 1 канала яркости I формула улучшения затемнённых областей выглядит следующим образом:

$$I'(r, c) = \alpha_s(r, c)I(r, c) + (1 - \alpha_s(r, c))(k_s I_a(r, c) + (1 - k_s)I(r, c)), \quad (14)$$

где k_s – коэффициент коррекции затемнённых областей; $k_s \in [0, 1]$.

Оценку освещённости I_f предлагается выполнять с помощью модифицированного билатерального фильтра, вычисляемого по формуле (11), где весовая функция по диапазону яркостей $\Phi(x)$ приведена в формуле (12). Оценка отражательной способности вычисляется как умноженное на коэффициент a отношение значений в канале яркости изображения и суммы оценки освещённости и $b\sigma_r$:

$$I_a(r, c) = \frac{aI(r, c)}{I_f(r, c) + b\sigma_r}, \quad (15)$$

где σ_r совпадает с σ_r в формуле (12); a и b – коэффициенты.

Предлагается использовать оценку освещённости I_f в качестве альфа-канала α_s . Тогда формулы (13) и (14) преобразуются к виду:

$$I'(r, c) = I(r, c) + k_s I(r, c) (1 - I_f(r, c)) \max \left(0, \frac{a}{I_f(r, c) + b\sigma_R} - 1 \right). \quad (16)$$

Как правило, входные изображения представлены в цветовом пространстве YCbCr. После коррекции канала яркости значения цветоразностного канала I'_{cb} вычисляются как:

$$I'_{cb}(r, c) = \begin{cases} \frac{(I_{cb}(r, c) - 2^{D_l-1})I'_I(r, c)}{I_I(r, c)} + 2^{D_l-1}, & I_I(r, c) \neq 0, \\ I_{cb}(r, c), & \text{иначе,} \end{cases} \quad (17)$$

где D_l – глубина цвета на канал. Значения пикселей цветового канала I'_{cr} вычисляются аналогичным образом. Эти преобразования позволяют избежать потери насыщенности.

Величины a , b , σ_r , размер окна билатерального фильтра N_o , параметр μ функции $\Phi(x)$ зависят от технологии печати и модели принтера. Они выбираются в ходе экспериментов по отпечаткам исходя из следующих соображений: яркость и контраст в затемнённых областях увеличивается, но при этом чёрные области не должны светлеть, шумы не должны усиливаться, заметные перепады яркости между областями не должны размываться.

Степень коррекции затемнённых областей регулируется единственным интуитивно понятным параметром k_s . В алгоритме автоматической коррекции затемнённых областей требуется определять значение k_s , причём для фотографий неповреждённых контровым светом k_s должно быть близко к 0, а для фатально испорченных фотографий близко к 1. Таким образом, k_s можно рассматривать как оценку качества изображений, повреждённых контровым светом: чем больше k_s , тем хуже качество фотографии.

Для определения k_s целесообразно использовать регрессионную модель, построенную с помощью машинного обучения. Для создания набора изображений была разработана программа, которая скачивала фотографии из социальных сетей, затем с помощью предложенного автором дерева решений [14] выбирала изображения, повреждённые контровым светом. Далее пользователи по формуле (16) корректировали затемнённые области, подбирая наилучшее значение k_s . Выбор набора признаков, метода машинного обучения и его гиперпараметров осуществлялся в ходе процедуры двойного скользящего контроля по группам однотипных изображений, где набор фотографий разделён на группы по производителю камеры. По критериям MAE, MSE и MedAE для построения модели регрессии выбран метод «случайный лес» для признаков, вычисляемых из матрицы совместной встречаемости канала яркости изображений.

Предлагаемая регрессионная модель предсказания k_s также применяется для оценки качества изображений. В таблице 8 приведено сравнение предлагаемой модели с известными универсальными безреференсными критериями качества изображений. Из таблицы можно видеть, что рассмотренные универсальные критерии качества изображений не способны адекватно оценивать качество

фотографий, повреждённых контровым светом, тогда как предлагаемая модель демонстрирует высокую корреляцию с результатами разметки человеком.

Таблица 8. Абсолютное значение коэффициента корреляции Пирсона c_r для универсальных критериев качества фотографий и предлагаемой регрессионной модели с результатами разметки человеком.

	BIQI	BRISQUE	NIQE	ILNIQE	OG-IQA	Предлагаемая модель
$ c_r $	0,22	0,05	0,13	0,23	0,13	0,69

Согласно проведённому опросу по напечатанным фотографиям результат улучшения затемнённых областей предлагаемым способом превосходит альтернативные способы автоматической коррекции. Пример обработки приведён на рисунке 8. По результатам проведённого эксперимента показано, что разработанные методы, позволяют в 10 раз сократить время подготовки фотографий к печати, в автоматическом режиме повысить качество напечатанного изображения и предотвратить печать более половины испорченных фотографий.



Рисунок 8 – Пример коррекции фотографии, повреждённой контровым светом: а) исходное изображение; б) результат коррекции.

В **шестой главе** рассмотрена группа преобразований и порядок их применения для изменения размеров и соотношения сторон документов и фотографий без модификации основных смысловых элементов изображения. При печати и копировании документов на бумагу, размер которой отличается от размера исходного документа, либо выполняется масштабирование содержимого документа, либо изображение обрезается (кадрируется), что может приводить к потере информации. Схожая задача возникает при печати фотографий без полей на фотопринтерах, имеющих фиксированный размер отпечатка, при несовпадении соотношения сторон фотографии и фотобумаги. Для получения при печати требуемого соотношения сторон такие фотографии обрезаются, что иногда приводит к существенному ухудшению композиции, потере важных деталей.

Можно выделить два типа «заметных» участков изображений, модификация которых нежелательна: на фрагменте изображения присутствует лицо, тело человека или его часть; на участке изображения есть протяжённые резкие изменения яркости. В работах [1, 3, 21] автором описано несколько подходов для

построения карты заметности. Для изменения размеров и соотношения сторон изображений документов и фотографий предлагаются следующие преобразования, основанные на анализе карты заметности:

- обрезка полос изображения с двух противоположных сторон, где размеры полос выбираются путём минимизации в обрезаемых областях суммы пикселей, которые оцениваются как заметные [1];
- дополнение изображений симметрично отраженными полосами с двух противоположных сторон, где размеры полос выбираются путём оценки заметности отражения [16];
- переформатирование (retargeting) изображений за счёт удаления или добавления малозаметных участков по всему полю изображения [20, 56–57, 81].

Без ограничения общности предположим, что для получения требуемого соотношения сторон необходимо уменьшить ширину изображения на N_c столбцов, то есть отрезать с левого края изображения x столбцов, а с правого края $N_c - x$ столбцов. Значение x определяется с помощью минимизации суммы карты заметности I_v в отрезаемых полосах:

$$x = \operatorname{argmin}_x \left(\sum_{r=0}^{H-1} \sum_{c=0}^x I_v(r, c) + \sum_{r=0}^{H-1} \sum_{c=W-1-N_c-x}^{W-1} I_v(r, c) \right), \quad (18)$$

где H и W – высота и ширина исходного изображения.

Если среднее из значений карты заметности в отрезаемых полосах превышает предопределённый порог, то делается вывод, что данное преобразование ведёт к ухудшению изображения, и следует исследовать возможность применения иных преобразований. Предложена последовательность применения преобразований и выработаны рекомендации для их реализации в системном и прикладном ПО систем сканирования и печати.

Для оценки эффективности предложенных преобразований проведён следующий эксперимент. Рассматривается печать без полей набора фотографий, имеющих соотношение сторон 4:3, на термосублимационном фотопринтере, который печатает на бумаге 15 на 10 см. Таблица 10 содержит результаты проведённого эксперимента. При использовании стандартного подхода композиция ухудшается у примерно 15% фотографий. Использование предлагаемой группы преобразований позволяет сократить это число более чем в 2 раза.

Таблица 10. Результаты изменения соотношения сторон фотографий.

Набор	% изображений, ухудшившихся при стандартной обрезке	% изображений, ухудшившихся при применении предлагаемых преобразований
1	15,1	6,8
2	14,6	7,1
3	15,3	6,9

На рисунке 9 показан пример обрезки полос. В случае отрезания с противоположных сторон одинакового количества столбцов (см. 9а) существенно

портится композиция фотографии. Именно такое преобразование используется по умолчанию в фотопринтерах при печати без полей. Предлагаемый способ (см. 9b) отрезает фоновую область с правого края фотографии.



Рисунок 9 – Пример обрезки полос: а) по умолчанию с противоположных сторон обрезаются полосы одинакового размера; б) результат предлагаемого преобразования.

Седьмая глава посвящена принципам автоматического выбора фотографий из набора и их размещения на странице. При необходимости напечатать несколько фотографий для фотоальбома или сформировать фотокнигу пользователи вынуждены тратить часы для выбора изображений из большой коллекции и их размещения на страницах. Чтобы сократить время пользователя на подготовку фотоальбомов предлагается следующий принцип автоматического выбора фотографий из коллекции для формирования фотоальбома [4, 7, 19, 21, 23, 36]:

1. автоматическая оценка качества изображений и исключение из дальнейшего рассмотрения некачественных;
2. кластеризация в двумерном пространстве «время съёмки – номер камеры»;
3. выбор одной фотографии из кластера путём ранжирования изображений с помощью построения карты значимости (saliency map) и детектирования лиц.

При оценке качества детектируются: размытые изображения, слабоконтрастные фотографии; кадры, повреждённые контровым светом; изображения, имеющие заметные артефакты сжатия; фотографии с высоким уровнем шума. Для реализации на цифровом процессоре обработки сигналов (DSP), у которого векторные инструкции реализованы только для 16-разрядных целых чисел, алгоритма оценки уровня шума как наименьшего собственного значения матрицы ковариации, построенной для значений пикселей блока изображения, предложен способ перемножения прямоугольных матриц 32-разрядных чисел с фиксированной точкой с помощью 16-разрядных векторных инструкций [9, 42]. Алгоритм обобщает умножение N -разрядных чисел с помощью $N/2$ -разрядных операций для матриц чисел с фиксированной точкой и использует тензорное произведение векторов вместо скалярного. При умножении матриц

размера 64 на 64 предлагаемый способ более чем в 5 раз быстрее реализации с помощью 32-разрядных скалярных операций.

В отличие от вставки в альбом уже напечатанных фотографий фиксированного размера, как было в доцифровую эпоху, при создании страниц цифровой фотокниги требуется устанавливать размер каждого добавляемого изображения. Сформулирован принцип размещения фотографий на странице с автоматическим определением коэффициентов масштабирования для каждого изображения. Принцип состоит в:

- формировании множества возможных схем размещения;
- определении для каждой схемы коэффициентов масштабирования изображений путём минимизации свободного пространства на странице и разницы между площадью изображений;
- выбора из схем оптимальной.

Кроме того, предложен оригинальный алгоритм создания плавного перехода между изображениями при автоматической генерации коллажа, где фотографии размещаются на странице в соответствии с предложенным принципом [19, 35].

В **заключении** перечислены основные результаты работы. В **приложении** представлены акты о внедрении результатов диссертации.

Основные результаты работы

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой *изложены новые научно обоснованные технические и организационные решения по разработке методов обработки изображений для систем сканирования и печати, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны*, что подтверждается 31 патентом на изобретение, выданным Федеральной службой по интеллектуальной собственности Российской Федерации «Роспатент».

Достигнута цель диссертационного исследования: разработан и внедрён комплекс из более чем 20 режимов работы, удовлетворяющих требованиям к качеству и производительности в условиях ограничений, накладываемых аппаратным обеспечением многофункциональных принтеров, что значительно улучшает потребительские свойства информационных систем сканирования и печати.

В диссертации решена общая научная задача исследования: существенным образом развит научно-методический аппарат разработки и реализации методов обработки изображений для создания комплекса новых и модернизированных решений в системах сканирования и печати в условиях существующих ограничений ресурсов и требований к качеству и производительности. В работе получены следующие результаты, соответствующие частным научным и прикладным задачам:

1. Предложена оригинальная спиральная методология НИР при создании решений для МФП, основанная на анализе и управлении рисками. Впервые выявлены и ранжированы по важности факторы, которые препятствуют реализации результата НИР в продукте. На стадии НИР данные факторы можно

рассматривать как риски. Использование методологии позволило в 3 раза повысить количество результатов НИР внедряемых в системное или встроенное ПО МФП.

2. Предложена методика (совокупность методов и последовательность их применения) разработки режимов сканирования, которая включает этапы устранения основных дефектов сканированных изображений, проведение сегментации, сохранение изображения в метафайл. Предложены способы оценки и коррекции скоса без использования дополнительной памяти, подавления печатного раstra, улучшения локального контраста, сегментации изображения на области фона, текста и картинок. На основе методики разработаны новые режимы:
 - сканирования и сохранения документа в PDF с векторизацией контуров символов; режим обеспечивает два цикла повторной печати и сканирования без существенной потери качества распознавания текста; при сходном визуальном качестве режим создаёт файл наименьшего размера, по сравнению с существующими способами;
 - копирования двухсторонних карточек на одну страницу с исправлением скоса и идентичной ориентацией обеих сторон; для 99 % карточек, стороны которых развёрнуты относительно друг друга на 180 градусов, ориентация определяется и исправляется.
3. Сформулирован подход к реализации специальных режимов печати путём локальной модификации кода процессора растровых изображений. Определены модули в процессоре растровых изображений Postscript для встраивания режимов печати в существующее программное обеспечение устройств печати. На основе подхода во встроенное ПО существующих устройств печати добавлены следующие новые функции:
 - режим печати микротекста, позволяющий автоматически «на лету» генерировать микросимволы размером около 1 типографского пункта для широкого набора языков без использования специальных шрифтов; добавление на страницу микротекста увеличивает время печати на 0,01 с, что незаметно для пользователя;
 - режим экономичной печати, позволяющий сократить использование краски на 13,4 % и обеспечивающий лучшее визуальное качество символов по сравнению с альтернативными способами;
 - режим черновой печати, в котором картинки преобразуются в цветные эскизы, при этом экономится до 80 % тонера, а время работы режима превышает время обычной печати лишь на 0,5 %;
 - режим добавления на страницу скрытых цифровых водяных знаков для сохранения идентификационного кода устройства; за счёт многократного дублирования информации способ позволяет извлечь скрытую информацию из копии и половины страницы.
4. Предложен подход к автоматической оценке и улучшению качества печатаемых фотографий, учитывающий размеры бумажного отпечатка, разрешение и технологию печати; на основе подхода разработаны новые методы оценки и

повышения резкости изображения, детектирования и коррекции «красных глаз», оценки и улучшения затемнённых областей; по результатам проведённых экспериментов разработанные методы превосходят существующие, позволяют по меньшей мере в 10 раз сократить время подготовки фотографий к печати, повысить качество напечатанного изображения и предотвратить печать более половины испорченных фотографий.

5. Предложена группа преобразований и последовательность их применения для изменения размеров и соотношения сторон документов и фотографий без модификации основных смысловых элементов изображения; разработанные преобразования предоставляют новые возможности при копировании документов с изменением размера бумаги и печати фотографий без полей; предложены новые алгоритмы для переформатирования изображений за счёт удаления или добавления малозаметных участков, дополнения изображений симметрично отраженными полосами и обрезания полос с двух противоположных сторон, где размеры полос выбираются путём оценки заметности отражения; применение предложенных преобразований позволяет избежать заметных искажений для более чем 50% фотографий, которые ухудшались при печати без полей.
6. Предложены принципы выбора и размещения фотографий для автоматической генерации коллажа и страницы фотокниги, где выбор выполняется путём кластеризации качественных изображений и их ранжирования с помощью карты значимости, при размещении решается задача оптимизации, в ходе которой определяются коэффициенты масштабирования изображений; на основе предложенных принципов разработаны новые методы выбора фотографий и формирования коллажа, которые по результатам проведённых опросов превосходят существующие.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Монографии (главы индексированы Scopus):

1. Safonov I.V., Kurilin I.V., Rychagov M.N., Tolstaya E.V. Adaptive Image Processing Algorithms for Printing //Springer Nature, Singapore, – 2018, – 304 с.
2. Safonov I.V., Kurilin I.V., Rychagov, M.N., Tolstaya, E.V. Document Image Processing for Scanning and Printing //Springer Nature, Switzerland, – 2019, – 306 с.

Статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК РФ или индексированные Scopus:

3. Egorova M.A., Murynin A.B., Safonov I.V. An Improvement of face detection algorithm for color photos //Pattern Recognition and Image Analysis. – 2009. – Т. 19. – с. 634-640. (Scopus, Q3)
4. Egorova M.A., Safonov I.V. Photobook generation algorithms //Pattern Recognition and Image Analysis. – 2011. – Т. 21. – с. 477-480. (Scopus, Q3)
5. Kurilin I.V., Safonov I.V., Rychagov M.N., Lee H., Kim S.H., Choi D.C. Embedding positional-independent hidden data into hardcopy //Pattern Recognition and Image Analysis. – 2011. – Т. 21. – с. 511-514. (Scopus, Q3)
6. Vil'kin A.M., Safonov I.V., Egorova M.A. Bottom-up document segmentation method based on textural features //Pattern Recognition and Image Analysis. – 2011. – Т. 21. – №. 3.– с. 565-568. (Scopus, Q3)
7. Egorova M.A., Safonov I.V. Algorithms for photo book authoring //Pattern recognition and image analysis. – 2013. – Т. 23. – с. 57-67. (Scopus, Q3)
8. Vil'kin A.M., Safonov I.V., Egorova M.A. Algorithm for segmentation of documents based on texture features //Pattern recognition and image analysis. – 2013. – Т. 23. – с. 153-159. (Scopus, Q3)
9. Safonov I., Kornilov A., Makienko D. An Approach for Matrix Multiplication of 32-Bit Fixed Point Numbers by Means of 16-Bit SIMD Instructions on DSP //Electronics. – 2022. – Т. 12. – №. 1. – с. 78-94. (Scopus, Q2)
10. Сафонов И.В., Матвеев И.А. Методология научно-исследовательской работы при создании функций систем сканирования и печати // Системы и средства информатики, 2023. Т. 33. № 3. с. 76-84. (ВАК, K1)

Главы в книгах, индексированные Scopus:

11. Patana E., Safonov I., Rychagov M. Adaptive generation of color anaglyph //Transactions on Computational Science XIX: Special Issue on Computer Graphics. – Springer, 2013. – с. 33-47.
12. Safonov I.V., Kornilov A.S., Reimers I.A. An Animated Graphical Abstract for an Image // Smart Algorithms for Multimedia and Imaging. – Springer, 2021. – с. 351–372.

Материалы международных конференций, индексированные Scopus и/или Web of Science:

13. Safonov I.V., Rychagov M.N., Kang K., Kim S.H. Automatic correction of exposure problems in photo printer //IEEE International Symposium on Consumer Electronics. – IEEE, 2006. – с. 1-6. (Scopus, WoS)
14. Safonov I.V. Automatic correction of amateur photos damaged by backlighting //Proc. International Conference on Computer Graphics and Vision (GRAPHICON 06). – 2006. – с. 80-89. (Scopus)

15. Safonov I.V. Automatic red eye detection //17th International Conference on Computer Graphics and Vision GRAPHICON-2007, 2007. – c. 112-119. (Scopus)
16. Safonov I., Tolstaya E. Matching aspect ratio of digital photo via complementing //17th International Conference on Computer Graphics and Vision GRAPHICON. – 2007. – c. 154-157. (Scopus)
17. Safonov I.V., Rychagov M.N., Kang K., Kim S.H. Automatic red eye correction and its quality metric //Color Imaging XIII: Processing, Hardcopy, and Applications. – SPIE, 2008. – T. 6807. – c. 276-285. (Scopus, WoS)
18. Safonov I.V., Rychagov M.N., Kang K., Kim S.H. Adaptive sharpening of photos //Color Imaging XIII: Processing, Hardcopy, and Applications. – SPIE, 2008. – T. 6807. – c. 256-267. (Scopus, WoS)
19. Egorova M., Safonov I., Korobkov N. Collage for cover of Photobook //18th International Conference on Computer Graphics and Vision GRAPHICON-2008. – 2008. – c. 160-163. (Scopus)
20. Bucha V., Safonov I., Rychagov M., Hong J.K., Kim S.H. Retargeting of digital photos and documents //Digital Photography V. – SPIE, 2009. – T. 7250. – c. 308-317. (Scopus)
21. Potapova E., Egorova M., Safonov I. Automatic photo selection for media and entertainment applications //19th International Conference on Computer Graphics and Vision GRAPHICON-2009. – 2009. – c. 117-124. (Scopus)
22. Kurilin I.V., Safonov, I.V., Lee, H., Kim S.H. Descreening of scanned images //Color Imaging XV: Displaying, Processing, Hardcopy, and Applications. – SPIE, 2010. – T. 7528. – c. 124-135. (Scopus, WoS)
23. Egorova M., Safonov I. Selection of photos for album building applications //2010 20th International Conference on Pattern Recognition. – IEEE, 2010. – c. 3256-3259. (Scopus)
24. Safonov I.V., Bucha V.V. Animated thumbnail for still image //20 International Conference on Computer Graphics and Vision GRAPHICON. – 2010. – c. 79-86. (Scopus)
25. Safonov I.V., Kurilin I.V., Rychagov M.N., Lee H., Kim S., Choi D. Fast approach for toner saving //Color Imaging XVI: Displaying, Processing, Hardcopy, and Applications. – SPIE, 2011. – T. 7866. – c. 369-378. (Scopus, WoS)
26. Safonov I., Lee, H., Kim, S., Choi, D. Intellectual two-sided card copy //21 International Conference on Computer Graphics and Vision GRAPHICON. – 2011. – c. 38-41. (Scopus)
27. Safonov I., Kurilin I. Deskew for card image scanning //21 International Conference on Computer Graphics and Vision GRAPHICON. – 2011. – c. 42-45. (Scopus)
28. Safonov I.V., Tolstaya E.V., Rychagov M.N., Lee H., Kim S.H., Choi D. Bio-inspired color sketch for eco-friendly printing //Color Imaging XVII: Displaying, Processing, Hardcopy, and Applications. – SPIE, 2012. – T. 8292. – c. 369-378. (Scopus, WoS)
29. Kurilin I.V., Safonov, I.V., Rychagov, M.N., Lee, H., Kim, S.H., Choi, D. Generation of PDF with vector symbols from scanned document //Image Quality and System Performance X. – SPIE, 2013. – T. 8653. – c. 233-247. (Scopus, WoS)

30. Kurilin I.V., Safonov I.V., Rychagov M.N., Lee H., Kim S.H. High-performance automatic cropping and deskew of multiple objects on scanned images //Image Quality and System Performance XI. – SPIE, 2014. – Т. 9016. – с. 100-109. (Scopus, WoS)
31. Kurilin I., Safonov I., Rychagov M., Zavalishin, S., Han D.H., Kim S.H. Fast algorithm for visibility enhancement of the images with low local contrast //Color Imaging XX: Displaying, Processing, Hardcopy, and Applications. – SPIE, 2015. – Т. 9395. – с. 94-102. (Scopus, WoS)
32. Zavalishin S.S., Safonov I.V., Bekhtin Y.S., Gurov V.S. Parameters adaptation framework for local contrast enhancement //6th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO). – IEEE, 2017. – с. 1-4. (Scopus, WoS)
33. Goncharova A.V., Safonov I.V., Romanov I.A. The regression model for the procedure of correction of photos damaged by backlighting //CEUR Workshop Proceedings. – 2019. – с. 326-333. (Scopus)

Материалы конференций:

34. Егорова М.А., Сафонов И.В. Размещение фотографий на холсте с определением коэффициентов масштабирования //31-я конференция молодых ученых и специалистов ИППИ РАН Информационные технологии и системы (ИТиС-2008). – 2008. – с. 90-96.
35. Kurilin I.V., Safonov I.V., Tolstaya E.V., Efimov S.V., Rychagov M.N. EXIF-based Image Enhancement Pipeline // Proceedings of 9th International conference on Pattern recognition and Image Analysis: New information technologies. 2008. – с. 375-378.
36. Потапова Е.В., Сафонов И.В. Ранжирование фотографий с использованием карты важности //12-я Международная конференция и выставка Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA), – 2010. – Т.2, с. 78-81.
37. Egorova M.A., Safonov I.V. Algorithms for photobook creation //Proc. of 10th International conference on Pattern recognition and Image Analysis: New information technologies. – 2010. – Т. 2, с.265-268.
38. Vil'kin A.M., Safonov I.V., Egorova M.A. Bottom-up page segmentation based on texture features //10th International conference on Pattern recognition and Image Analysis: New information technologies. – 2010. – Т. 2. с. 373-376.
39. Вилькин А.М., Сафонов И.В., Егорова М.А. Алгоритм сегментации документов //DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. – 2011. – Т. 1. – №. 3. – с. 112-115.
40. Вилькин А.М., Сафонов И. В., Егорова М.А. Использование Matlab для оценки качества сегментации документов //Международная конференция Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB. – 2011. – Т. 1. – с. 442-445.
41. Patana E., Safonov I., Rychagov M. Adaptive 3D color anaglyph generation for printing //22nd International Conference on Computer Graphics and Vision GRAPHICON. – 2012. – с. 1-5.
42. Сафонов И., Аюпов А., Бёрнс С. Умножение матриц n-разрядных чисел с фиксированной точкой с помощью n/2-разрядных векторных инструкций //Проблемы разработки перспективных микро-и наноэлектронных систем (МЭС). – 2016. – №. 3. – с. 141-148.

Патенты на изобретения РФ и США:

43. Сафонов И.В. Система и способ коррекции изображения при выводе на устройство печати: пат. 2298293 Рос. Федерация. № 2004116860/09; заявл. 04.06.2004; опубл. 27.04.2007, Бюл. № 12.
44. Гаврилов А.Р., Сафонов И.В. Система и способ копирования: пат. 2308166 Рос. Федерация. № 2004120488/09; заявл. 07.07.2004; опубл. 10.10.2007, Бюл. № 28.
45. Рычагов М.Н., Сафонов И.В. Система и способ сканирования: пат. 2298292 Рос. Федерация. № 2004129644/09; заявл. 11.10.2004; опубл. 27.04.2007, Бюл. № 12.
46. Сафонов И.В., Рычагов М.Н. Система и способ сканирования и копирования: пат. 2368091 Рос. Федерация № 2004135515/09; заявл. 06.12.2004; опубл. 20.05.2006, Бюл. № 14.
47. Сафонов И.В. Система и способ коррекции темных оттенков на цифровых фотографиях: пат. 2298223 Рос. Федерация. № 2005112311/09; заявл. 25.04.2005; опубл. 27.04.2007, Бюл. № 12.
48. Safonov I.V. Method and apparatus for adjusting brightness of image: пат. 7702177 США. № 20060239583; заявл. 26.10.2006; опубл. 20.04.2010.
49. Сафонов И.В. Способ улучшения цифровых изображений: пат. 2298226 Рос. Федерация. № 2005133120/09; заявл. 28.10.2005; опубл. 27.04.2007, Бюл. № 12.
50. Рычагов М.Н., Сафонов И.В., Толстая Е.В., Ефимов С.В., Канг Ки-Мин, Ким Санг-Хо Способ повышения качества цифрового фотоизображения: пат. 2400815 Рос. Федерация. № 2006135550/09; заявл. 09.10.2006; опубл. 27.09.2010, Бюл. № 11.
51. Сафонов И.В. Способ автоматической коррекции эффекта красных глаз: пат. 2320011 Рос. Федерация. № 2006123847/09; заявл. 05.07.2006; опубл. 20.03.2008, Бюл. № 8.
52. Сафонов И.В. Способ автоматической коррекции эффекта красных глаз: пат. 2324225 Рос. Федерация. № 2006132154/09; заявл. 07.09.2006; опубл. 10.05.2008, Бюл. № 13.
53. Сафонов И.В., Гаврилов А.Р., Аликберов И.Р. Способ устранения эффекта красных глаз на цифровых цветных изображениях для пары глаз: пат. 2338255 Рос. Федерация. № 2006137150/09; заявл. 20.10.2006; опубл. 10.11.2008, Бюл. № 31.
54. Сафонов И.В. Способ предотвращения печати размытых фотографий: пат. 2338252 Рос. Федерация. № 2007108381/09; заявл. 06.03.2007; опубл. 10.11.2008, Бюл. № 31.
55. Сафонов И.В. Способ адаптивного повышения резкости цифровых изображений в процессе печати: пат. 2383924 Рос. Федерация. № 2007113703/09; заявл. 12.04.2007; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 7.
56. Буча В.В., Сафонов И.В., Рычагов М.Н. Способ и система адаптивного переформатирования цифровых изображений: пат. 2368006 Рос. Федерация. № 2008100088/09; заявл. 10.01.2008; опубл. 20.09.2009, Бюл. № 26.
57. Bucha V.V., Safonov I.V., Rychagov M.N. Method and system of adaptive reformatting of digital image: пат. 8472753 США. № 20090180713; заявл. 16.07.2009; опубл. 25.06.2013.

58. Сафонов И.В., Яковлев С.Ю. Способ формирования символов для микропечати: пат. 2365510 Рос. Федерация. № 2008101807/12; заявл. 23.01.2008; опубл. 27.08.2009, Бюл. № 24.
59. Safonov I.V., Yakovlev S.Yu. Method of forming characters for microprint and image forming apparatus using the same: пат. 8248622 США. № 20090185210; заявл. 23.07.2009; опубл. 21.09.2012.
60. Safonov I.V., Yakovlev S.Yu. Method of forming characters for microprint and image forming apparatus using the same: пат. 8493575 США. № 20120268754; заявл. 25.10.2012; опубл. 23.07.2013.
61. Safonov I.V., Yakovlev S.Yu. Method of forming characters for microprint and image forming apparatus using the same: пат. 8736853 США. № 20130278971; заявл. 24.10.2013; опубл. 27.05.2014.
62. Ефимов С.В., Рычагов М.Н., Сафонов И.В., Курилин И.В. Способ сегментации текста по цветовому признаку в процессе копирования: пат. 2368007 Рос. Федерация. № 2008111139/09; заявл. 25.03.2008; опубл. 20.09.2009, Бюл. № 26.
63. Толстая Е.В., Сафонов И.В., Курилин И.В., Ефимов С.В., Рычагов М.Н. Способ повышения качества цифрового изображения на основе метаданных: пат. 2374688 Рос. Федерация. № 2008113577/09; заявл. 10.04.2008; опубл. 27.11.2009, Бюл. № 33.
64. Сафонов И.В., Курилин И.В. Способ подавления растра: пат. 2405279 Рос. Федерация. № 2008128581/09; заявл. 15.07.2008; опубл. 27.11.2010, Бюл. № 5.
65. Курилин И.В., Сафонов И.В. Способ адаптивного сглаживания для подавления растровой структуры изображения: пат. 2411584 Рос. Федерация. № 2008134165/28; заявл. 21.08.2008; опубл. 10.02.2011, Бюл. № 4.
66. Сафонов И.В., Яковлев С.Ю., Аликберов И.Р., Курилин И.В. Способ и система для снижения расхода краски при печати: пат. 2405201 Рос. Федерация. № 2009122721/09; заявл. 16.06.2009; опубл. 27.11.2010, Бюл. № 33.
67. Сафонов И.В., Ли Хо Кеун, Ким Санг Хо Способ копирования двухсторонних оригиналов: пат. 2435217 Рос. Федерация. № 2009146134/08; заявл. 14.12.2009; опубл. 27.11.2011, Бюл. № 17.
68. Safonov I.V., Lee Hokeun, Kim SangHo Image forming apparatus and method of copying two-sided card thereof: пат. 8508811 США. № 20110141534; заявл. 16.06.2011; опубл. 13.08.2013.
69. Safonov I.V., Lee Hokeun, Kim SangHo Image forming apparatus and method of copying two-sided card thereof: пат. 8724189 США. № 20130293917; заявл. 07.11.2013; опубл. 13.05.2014.
70. Сафонов И.В., Курилин И.В. Способ внедрения скрытого цифрового сообщения в печатаемые документы и извлечения сообщения: пат. 2431192 Рос. Федерация. № 2010100795/08; заявл. 12.01.2010; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 28.
71. Сафонов И.В., Курилин И.В. Способ и система встраивания и извлечения скрытых данных в печатаемых документах: пат. 2446464 Рос. Федерация. № 2010117994/08; заявл. 06.05.2010; опубл. 27.03.2012, Бюл. № 32.
72. Сафонов И.В., Толстая Е.В. Способ черновой печати посредством преобразования растровых изображений в эскизы (варианты): пат. 2445677 Рос. Федерация. № 2010137868/08; заявл. 13.09.2010; опубл. 20.03.2012, Бюл. № 8.

73. Safonov I.V., Tolstaya E.V. Printing control device, imaging forming apparatus, and imaging forming method: пат. 8730526 США. № 20120062957; заявл. 15.03.2012; опубл. 20.05.2014.
74. Tolstaya E.V., Safonov I.V. Printing control device, imaging forming apparatus, and imaging forming method: пат. 9075548 США. № 20140218769; заявл. 07.08.2014; опубл. 07.07.2015.
75. Курилин И.В., Сафонов И.В., Ли Хокеун Способ редактирования статических цифровых комбинированных изображений, включающих в себя изображения нескольких объектов: пат. 2458396 Рос. Федерация. № 2011129843/08; заявл. 19.07.2011; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 22.
76. Kurilin I.V., Lee Hokeun, Safonov I.V. Method of editing static digital combined images comprising images of multiple objects: пат. 9179035 США. № 20130021629; заявл. 24.01.2013; опубл. 03.11.2015
77. Патана Е.И., Сафонов И.В. Адаптивный способ создания и печати цветных анаглифных изображений: пат. 2481635 Рос. Федерация. № 2011132463/08; заявл. 02.08.2011; опубл. 10.05.2013, Бюл. № 13.
78. Данилевич А.Б., Сафонов И.В. Система и способ черновой печати посредством преобразования картинок в контурные эскизы: пат. 2469399 Рос. Федерация. № 2011138830/08; заявл. 22.09.2011; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 34.
79. Danilevich A.B., Safonov I.V. Print control apparatus, image forming apparatus, and method for forming image: пат. 9036203 США. № 20130077106; заявл. 28.03.2013; опубл. 19.05.2015.
80. Курилин И.В., Сафонов И.В., Ли Хокеун Способ преобразования растрового изображения в метафайл: пат. 2469400 Рос. Федерация. № 2011146617/08; заявл. 17.11.2011; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 34.
81. Ли Енмин, Сафонов И.В., Курилин И.В. Способ и система для просмотра изображения на устройстве отображения: пат. 2509377 Рос. Федерация. № 2012122959/08; заявл. 05.06.2012; опубл. 10.03.2014, Бюл. № 7.
82. Сафонов И.В. Система и способ преобразования тонов плоских и объемных изображений: пат. 2509366 Рос. Федерация. № 2012144223/08; заявл. 17.10.2012; опубл. 10.03.2014, Бюл. № 7.
83. Курилин И.В., Сафонов И.В. Способ и система улучшения текста при цифровом копировании печатных документов: пат. 2520407 Рос. Федерация. № 2012148763/08; заявл. 16.11.2012; опубл. 27.06.2014, Бюл. № 18.
84. Михеев С.М., Курилин И.В., Сафонов И.В., Вилькин А.М. Способ и система преобразования моментального снимка экрана в метафайл: пат. 2534005 Рос. Федерация. № 2013104245/08; заявл. 01.02.2013; опубл. 27.11.2014, Бюл. № 33.