

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

АППАРАТНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ОЦЕНКИ НЕОДНОРОДНОСТИ ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рекомендовано
учебно-методическим объединением по образованию
в области природопользования и лесного хозяйства
в качестве учебно-методического пособия для студентов
учреждений высшего образования по специальности
6-05-0711-03 «Технология и переработка биополимеров»
и учебно-методическим объединением по химико-технологическому
образованию в качестве учебно-методического пособия
для студентов учреждений высшего образования по специальностям
6-05-0714-07 «Печатные цифровые системы и комплексы»,
6-05-0722-06 «Принттехнологии»

Минск 2025

УДК 676.2.017:004.4(075.8)
ББК 35.779:32.972я73
А76

Авторы:

М. А. Зильберглейт, С. К. Грудю, А. А. Коренькова, Н. П. Мидуков

Рецензенты:

кафедра «Промышленный дизайн и упаковка»

Белорусского национального технического университета

(кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры *Д. М. Медяк*;

доцент, заведующий кафедрой *П. А. Кашевский*);

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник

ГНУ «Объединенный институт проблем информатики

Национальной академии наук Беларуси» *В. В. Старовойтов*

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или ее части не может быть осуществлено без разрешения учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Аппаратные и программные средства оценки неоднородности целлюлозных композиционных материалов : учеб.-метод. пособие для студентов специальностей 6-05-0711-03 «Технология и переработка биополимеров», 6-05-0714-07 «Печатные цифровые системы и комплексы», 6-05-0722-06 «Принттехнологии» / М. А. Зильберглейт, С. К. Грудю, А. А. Коренькова, Н. П. Мидуков. – Минск : БГТУ, 2025. – 89 с.
ISBN 978-985-897-258-5.

Учебно-методическое пособие посвящено актуальной методике анализа неоднородности целлюлозных композитов. В основе подхода лежат современные физические методы исследования, позволяющие детально изучать как внешние, так и внутренние характеристики материалов с последующей визуализацией полученных данных. Материал пособия охватывает весь спектр необходимых знаний: от фундаментальных аспектов обработки информации до конкретных практических решений. Особое внимание уделяется работе с современным оборудованием и программным обеспечением для анализа изображений. Практическая ценность издания подтверждается наличием специальной главы, демонстрирующей методику оценки неоднородности на примере картонных материалов.

УДК 676.2.017:004.4(075.8)
ББК 35.779:32.972я73

ISBN 978-985-897-258-5

© УО «Белорусский государственный технологический университет», 2025
© Зильберглейт М. А., Грудю С. К.,
Коренькова А. А., Мидуков Н. П., 2025

ВВЕДЕНИЕ

При анализе характеристик бумаги для печати часто используется термин «просвет» (ранее обозначаемый как «облачность»). Этот параметр описывает неравномерное распределение волокнистых компонентов в структуре бумаги или картона, которое становится видимым при так называемом донном освещении. Термин «просвет» можно найти в ГОСТ 19088–89 «Бумага и картон. Термины и определения», а также в ОСТ 29.42–98 «Термины и определения дефектов материалов и полуфабрикатов для печати».

В этих документах описывается распределение компонентов бумаги, которое можно визуально оценить при проходящем свете, разделяя его на равномерное, облачное и клочковатое. Требования к просвету бумаги формулируются абстрактно с указанием на необходимость однородности просвета и его соответствия образцу, утвержденному заказчиком.

Наличие неконтролируемой облачности может привести к двум негативным явлениям: повышенной обрывности и низкому качеству печати. Неравномерное распределение волокнистых материалов в бумаге проявляется в наличии шероховатости поверхности, которое состоит в рассеивании света и гетерогенности внутренней структуры, что обусловлено неравномерностью упаковки разнородного волокна.

Попытка решить первую проблему в виде оценки шероховатости (гладкости) при определении воздухопроницаемости между стандартной пластиной и образцом бумаги годится только для образцов, характеризующихся резким отличием таких свойств. Особые неприятности заложены в интегральном характере этого показателя, который нивелирует характерные отличия. На этом фактически и заканчиваются методы оценки неоднородности поверхности.

Оценка неоднородности внутренней структуры бумаги путем исследования разброса значений показателей прочности характеризуется тем же недостатком, так как визуальная структура бумажного образца не фиксируется. Попытка сузить область изучаемой поверхности наталкивается на внушительные материальные трудности в виде значительных затрат, а также по-прежнему мы не можем получить никаких визуальных данных о структуре. Например,

при определении так называемой «нулевой разрывной длины» требуется дорогое прецизионное оборудование.

В качестве современного подхода к решению задач, связанных с оценкой неоднородности, применяется анализ этого показателя при помощи физических методов, которые исследуют в первую очередь внешнюю и внутреннюю поверхность и позволяют фиксировать результаты в виде изображений.

Использование современных методов обработки изображений в бумажной и полиграфической промышленности сопровождается трудностями в понимании таких подходов. Специалисты бумажной отрасли фактически не применяют данные методы, за исключением получившего распространение в последнее время сканирования поверхности или структуры бумажного листа с выводом конечного результата и с его неясным толкованием. Полиграфисты и бумажники, работающие в печатной отрасли, сосредоточены на улучшении качества отпечатка и используют свои трактовки и свою терминологию, которые, по нашему мнению, далеки от сути поднятого вопроса.

На основе вышеизложенного мы бы хотели сформировать твердое понимание терминологии, а также некоторых, наиболее важных методов, используемых в обработке изображений. Эти методы рассмотрены в контексте улучшения изображений, что поможет яснее понять, какой эффект они оказывают на изображение.

ГЛАВА 1

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЦИФРОВОЙ ФИКСАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Изображение можно определить как двумерную функцию (x, y) , где x и y – координаты в пространстве (конкретно на плоскости), и значение которой в любой точке, задаваемой парой координат (x, y) , называется интенсивностью или уровнем серого изображения в этой точке. Если величины x, y принимают конечное число дискретных значений, то говорят о цифровом изображении. Каждое число, представляющее значение яркости изображения в определенном месте, называется элементом изображения или пикселем. Физически пиксель можно представить как минимальный элемент изображения квадратной или круглой формы, характеризующийся цветом и яркостью.

С понятием «пиксель» связан термин «растр» или «растровое изображение», т. е. массив ячеек, на который разбивается изображение, и в каждой ячейке находится пиксель. Детализация изображения определяется числом пикселей. При этом детализация изображения не может быть увеличена за счет увеличения масштаба. При увеличении масштаба пиксели превращаются в квадраты разной яркости (рис. 1).

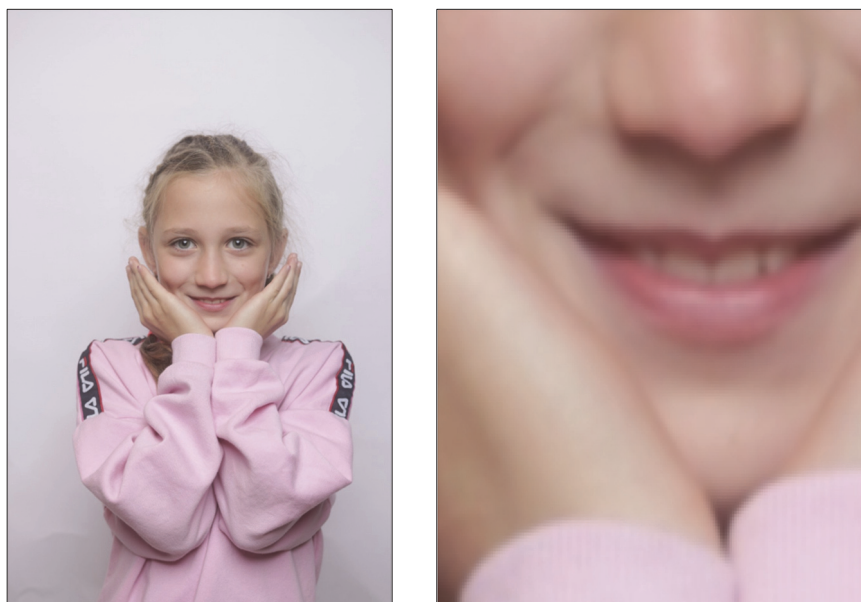


Рис. 1. Увеличение масштаба изображения, не улучшающее его качество

Цифровой обработкой изображений называется обработка цифровых изображений с помощью цифровых вычислительных машин (компьютеров). Заметим, что цифровое изображение состоит из конечного числа элементов, каждый из которых расположен в конкретном месте и принимает определенное значение. Эти элементы называются *элементами изображения* или, как уже выше упоминалось, *пикселями*. Чаще всего для элементов цифрового изображения используется последний термин.

Зрение является наиболее совершенным из наших органов чувств, поэтому неудивительно, что зрительные образы играют важнейшую роль в человеческом восприятии. Однако, в отличие от людей, способных воспринимать электромагнитное излучение лишь в видимом диапазоне, машинная обработка изображений охватывает практически весь электромагнитный спектр от гамма-излучения до радиоволн. Обработываемые изображения могут порождаться такими источниками, которые для человека непривычно связывать с наблюдаемыми изображениями. Таковы, например, ультразвуковые изображения; изображения, получаемые в электронной микроскопии или генерируемые компьютером. Таким образом, цифровая обработка изображений охватывает широкие и разнообразные области применения.

Не существует общепринятой точки зрения, где заканчивается обработка изображений и начинаются другие смежные области, например *анализ изображений* и *машинное зрение*. Иногда разграничение делается здесь по тому принципу, что обработка изображений определяется как дисциплина, в которой на входе и на выходе процесса присутствуют изображения. Исходя из вышеприведенного замечания, мы видим, что естественным этапом перехода от обработки изображений к их анализу выступает распознавание отдельных областей или объектов на изображении. В качестве простой иллюстрации, разъясняющей указанные понятия, рассмотрим область автоматизированного анализа печатного или рукописного текста. В сферу цифровой обработки изображений входят процессы получения изображения области, содержащей этот текст, предварительной обработки полученного изображения, выделения (сегментации) отдельных символов текста, описания символов в подходящей для компьютерной обработки форме и, наконец, распознавания этих символов. Что касается осмысления содержимого страницы, то оно может быть отнесено уже к сфере анализа изображений или даже машинного зрения, в зависимости от уровня сложности.

Одно из первых применений цифровых изображений было опробовано в газетном деле для передачи иллюстраций по трансокеанскому подводному кабелю между Лондоном и Нью-Йорком. В начале 1920-х гг. была внедрена система «Бартлейн» для передачи изображений по кабелю, что позволило уменьшить время доставки иллюстраций через Атлантику с обычной недельной задержки до трехчасовой. С помощью специального печатающего оборудования осуществлялось кодирование исходного изображения для передачи по кабелю и последующее восстановление этого изображения на приемной стороне.

Ряд начальных проблем, связанных с улучшением визуального качества этих первых цифровых изображений, относился к выбору процедуры печати и распределению уровней интенсивности. Способ печати, с помощью которого были получены первые изображения, был отвергнут в пользу технологии фотографической репродукции с использованием перфоленты, формируемой телеграфным аппаратом на приемной стороне линии.

С 1960-х гг. до настоящего времени область применения обработки изображений значительно расширилась. Помимо медицинских и космических приложений, методы цифровой обработки изображений сегодня используются в широком спектре областей. Компьютеризированные процедуры применяются для облегчения восприятия рентгеновских и иных изображений в промышленности, медицине и биологии путем повышения контраста или цветового кодирования различных уровней интенсивности (представления изображений в псевдоцветах). Аналогичные методы используются в географии для изучения картины загрязнений окружающей среды по данным аэрофотосъемки и космическим снимкам. Методы улучшения и восстановления изображений применяются при обработке некачественных изображений утраченных объектов или трудновоспроизводимых экспериментальных результатов. Например, в археологии с помощью методов цифровой обработки изображений удалось по имеющимся нечетким фотографиям успешно восстановить первоначальный вид раритетов, которые со времени съемки были утрачены или повреждены. В физике и смежных областях компьютерная обработка является обычным способом улучшения качества изображений, получаемых в ходе экспериментов, как, например, в электронной микроскопии или физике высокотемпературной плазмы. Аналогичные примеры успешного использования технологий обработки изображений можно найти в астрономии, биологии, медицинской радиологии, промышленности, оборонной и правоохранительной сфере.

Приведенные примеры относились к случаям, когда результаты обработки предназначены для восприятия человеком. Другая крупная область применения методов обработки изображений – это решение задач, связанных с *машинным восприятием изображений*. В этом случае в центре внимания находятся процедуры, которые извлекают из изображения некоторую *информацию* и представляют ее в форме, подходящей для компьютерной обработки. Часто эта информация весьма мало похожа на визуальные признаки, используемые людьми при интерпретации содержимого изображения. Примерами информации такого рода, часто применяемой при машинном восприятии изображений, могут быть различные математические методы обработки (например, статистические моменты (дисперсия), коэффициенты преобразования Фурье, значения многомерного расстояния и др.). Типичными задачами машинного восприятия, в которых интенсивно используются методы обработки изображений, являются автоматическое распознавание символов, системы машинного зрения для автоматизации сборки и контроля продукции, задачи опознавания «свой – чужой» для военных объектов, автоматическая обработка отпечатков пальцев, проверка анализов крови и результатов рентгеновских исследований, компьютерная обработка аэрофотоснимков и спутниковых изображений с целью прогнозирования погоды и экологического мониторинга.

ГЛАВА 2

ОСНОВНЫЕ СТАДИИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Регистрация изображения осуществляется различными физическими методами, использующими гамма-лучи, рентгеновские лучи, ультрафиолетовый, видимый, инфракрасный диапазоны, микроволновой диапазон, диапазон радиоволн.

Из всего спектра человеческий глаз способен улавливать излучение только в очень узком диапазоне видимого света. От одного его края до другого частота излучения (а равно длина волны и энергия квантов) меняется менее чем в 2 раза. Для сравнения самые длинные радиоволны в 10^{14} раз длиннее видимого излучения, а самые энергичные гамма-кванты – в 10^{20} раз. Тем не менее на протяжении многих тысяч лет большую часть информации об окружающем мире люди черпали из диапазона видимого излучения, границы которого определяются свойствами светочувствительных клеток человеческой сетчатки.

Разные длины волн видимого света воспринимаются человеком как разные цвета – от красного до фиолетового. Традиционное деление видимого диапазона спектра на семь цветов радуги является культурной условностью. Никаких четких физических границ между цветами нет. Англичане, например, обычно делят радугу на шесть цветов. Известны и другие варианты. За восприятие всего разнообразия цветов и оттенков видимого света отвечают всего три различных типа рецепторов, которые чувствительны к красному, зеленому и синему цвету. Это позволяет воспроизводить практически любой цвет, смешивая на экране эти три основных цвета.

Отправляясь от видимого света в длинноволновую сторону спектра, мы попадаем в диапазон инфракрасного (ИК) излучения. Ближнее ИК-излучение физически ничем не отличается от видимого света, за исключением того, что не воспринимается сетчаткой глаза. Его можно регистрировать теми же приборами, в частности, специализированными микроскопами, что и видимый свет. К инфракрасному диапазону примыкает радиоизлучение, которое охватывает весь длинноволновый край электромагнитного спектра.

С коротковолновой стороны от видимого света располагается ультрафиолетовый диапазон, который делят на ближний и вакуумный. Органами чувств человек его не воспринимает. Формальной границы между жестким ультрафиолетовым и рентгеновским излучением нет. К рентгену принято относить излучение, способное вызывать возбуждение атомных ядер – подобно тому, как видимое и инфракрасное излучение возбуждает электронные оболочки атомов и молекул. В этом случае даже жесткий вакуумный ультрафиолет в некоторых случаях может быть отнесен к рентгену. Граница, на которой рентгеновский диапазон сменяется гамма-излучением, также условна.

Рассмотрим некоторые конкретные приемы регистрации неоднородных объектов (бумага, картон).

Ультразвуковые методы используют звуковые волны, имеющие частоты обычно в диапазоне мегагерц (МГц). Звуковая волна, проходя через материал, теряет энергию, когда сталкивается с дефектом. Ультразвуковые волны способны проникать в материалы, что позволяет изучать микроструктуру материалов, обнаруживать небольшие дефекты, исследовать межфазные переходы, а также получать информацию о механических свойствах. Две основные ультразвуковые техники – это метод проходящей волны и метод импульсного эха. Наиболее часто используемыми типами волн в неразрушающем контроле (НК) являются продольные и сдвиговые волны. Эти волны служат для определения толщины материалов и покрытий, а также для оценки материалов по отношению к дефектам, микроструктурам и остаточным напряжениям. Ультразвуковые методы также применяются для оценки отделений и расслоений в различных материалах. Для характеристики поверхностных дефектов используются поверхностные волны Рэлея и волны Лэмба. Поверхностные волны можно использовать для оценки качества соединений. Метод обратного рассеяния ультразвука применяется для характеристики поверхностных слоев в случае закаленных компонентов. Для оценки размера зерен в поверхностных зонах используются моды поверхностных волн с такими параметрами, как амплитуда обратнорассеянной утечки волны Рэлея и амплитуда поверхностной волны Рэлея.

На основании достижений в электронике и лазерах в последнее время было разработано несколько методов ультразвуковой визуализации. Здесь обсуждаются два метода микроскопии, которые используют ультразвуковые волны с частотами примерно от 10 МГц до 2 ГГц, а именно: сканирующая акустическая микроскопия (SAM) и сканирующая лазерная акустическая микроскопия (SLAM).

В системе SAM применяется сфокусированный ультразвуковой луч для получения изображения аналогично оптическому микроскопу. Волна, генерируемая ультразвуковым преобразователем, фокусируется акустической линзой, а затем частично отражается от объекта. Амплитуда и/или фаза возвращающихся звуковых волн измеряются. Если расстояние между линзой и объектом поддерживается в фокусе, а амплитуда возвращающейся звуковой волны записывается как функция координат поверхности объекта, получается акустическое изображение поверхности объекта.

Принцип работы сканирующего лазерного акустического микроскопа состоит в том, что образец обрабатывается импульсным звуком под углом относительно поверхности образца. Ультразвук вызывает динамическую рябь противоположной поверхности в однородном образце, от которой отражается лазерный луч и направляется на фотодиод. Рябь приводит к частичному дифракционному отклонению и частотному смещению лазерного луча, которое демодулируется методом клинового детектора. Амплитуда переменного компонента в фотодиоде пропорциональна амплитуде ряби. Ультразвуковая волна рассеивается и отражается порами, включениями, трещинами и разрывом связи, которые, в свою очередь, становятся видимыми как модуляция ранее гомогенной поверхности ряби. Сканированием лазерным лучом по образцу эти модуляции отображаются на компьютере. Разрешение таких изображений задается длиной волны λ ультразвука и обычно составляет 50 мкм. Измеряя как амплитуду, так и фазу этого голографического акустического поля, можно восстановить геометрию дефекта.

Лазерные методы используются как часть процедуры квалификации и также для оценки изменения качества поверхности. Одним из наиболее широко применяемых методов является метод лазерного рассеяния. Он предназначен для оценки шероховатости поверхности, повреждения от усталости, дефектов в модифицированных поверхностных покрытиях/слоях и для обнаружения трещины/дефекта склейки в композитах. В этом методе лазерный луч от гелий-неонового лазера направляется на образец, поверхность которого подлежит оценке. Рассеянное излучение попадает на полупрозрачный экран, расположенный на расстоянии 600 мм от образца. Экран помещается перпендикулярно направлению зеркального отражения луча. Камера с зарядовой связью (CCD), подключенная к компьютеру через карту захвата изображения, располагается позади экрана вдоль направления зеркального отражения. Параметры лазерного рассеяния, такие как высота пика и полная ширина на уровне половины максимума,

используются для оценки характеристик поверхности. С помощью метода лазерного рассеяния определяются вариации порядка 25 мк.

Методы атомно-силовой микроскопии. Методы для оценки шероховатости на поверхности твердых тел, основанные либо на механическом контакте, либо на оптических бесконтактных датчиках, применимы также для покрытий и слоев. Атомно-силовой микроскоп (АСМ) является последним достижением в этой области. Рабочий принцип АСМ следующий. Кантилевер, чрезвычайно чувствительный к слабым силам, фиксируется с одного конца, а другой конец имеет острый наконечник, который слегка касается поверхности образца. Когда поверхность сканируется, из-за ультрамалых сил отталкивания между атомами кончика и атомами поверхности образца кантилевер будет двигаться вверх и вниз в направлении, перпендикулярном поверхности образца. Топографические изображения получаются путем записи отклонений кантилевера, соответствующих контурам силы взаимодействия между кончиком и атомами поверхности образца. АСМ применяется для измерения шероховатости поверхности в небольших областях (менее 100 мкм) с контактом и без него.

Гамма-лучи. В этом случае используется радиоактивный изотоп, распад которого сопровождается гамма-излучением. Это излучение регистрируется детекторами гамма-излучения, сигналы которых и служат для формирования изображения.

Рентгеновские лучи – один из самых старых источников электромагнитного излучения, используемых для получения изображений. Хорошо известно применение рентгеновских лучей для медицинской диагностики, однако они также широко используются в промышленности и других областях. Рентгеновское излучение для формирования изображений генерируется с помощью рентгеновской трубки – вакуумного прибора с катодом и анодом. Катод находится в нагретом состоянии, вследствие чего испускает свободные электроны, которые с высокой скоростью летят к положительно заряженному аноду. При соударении электронов с ядрами атомов материала анода энергия выделяется в форме рентгеновского излучения. Энергия рентгеновских лучей (часто называемая «жесткостью»), определяющая их проникающую способность, регулируется изменением приложенного к аноду напряжения, а интенсивность излучения (количество рентгеновских лучей) регулируется изменением тока, проходящего через нить накала катода.

Изображение в видимом свете получают с помощью оптического микроскопа. Диапазон примеров простирается от фармацевтики и микроскопических методов производственного контроля до опреде-

ления характеристик материалов. Даже в пределах одной микроскопии множество возможных прикладных областей слишком обширно, чтобы его детально описать.

Интересным оборудованием для исследования бумаги являются сканеры, предназначенные для оцифровки фотопленки. Стандартный размер (это обычно 24 на 36 мм) позволяет осуществить достаточно широкий охват, а также по нашему опыту производить просвечивание за приемлемое время с разрешением до 4800 dpi.

Электронный микроскоп действует аналогично оптическому с той разницей, что вместо световых лучей для получения изображения исследуемого объекта применяется сфокусированный пучок электронов. Работа электронного микроскопа складывается из следующих основных шагов. Источник испускает поток электронов, которые благодаря приложенному положительному напряжению движутся с ускорением в направлении исследуемого образца. С помощью металлических щелевых диафрагм и магнитных линз этот поток ограничивается и фокусируется, образуя тонкий пучок, сфокусированный на образце. Внутри облучаемого образца происходит взаимодействие, оказывающее влияние на прохождение пучка электронов, эффект от которого обнаруживается и преобразуется в изображение аналогично тому, как свет отражается или поглощается объектами наблюдаемой сцены.

Перечисленные основные шаги имеют место во всех электронных микроскопах независимо от их типа.

Принцип работы просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) во многом аналогичен проектору слайдов. Проектор направляет (передает) пучок света на слайд; при проходе этого пучка сквозь слайд свет модулируется содержимым слайда. После этого пучок света проецируется на экран, формируя увеличенное изображение слайда. ПЭМ работает точно так же, за исключением того, что сквозь образец, играющий роль слайда, направляется пучок электронов.

Сканирующий (растровый) электронный микроскоп (СЭМ или РЭМ) осуществляет действительное сканирование образца электронным пучком и запись отраженного результата взаимодействия электронного пучка с каждой точкой поверхности образца. Полное изображение формируется путем растрового сканирования образца электронным пучком аналогично телевизионной развертке. Отраженные электроны при попадании на фосфоресцирующий экран создают на нем видимое изображение.

Улучшение изображения входит в число наиболее простых областей цифровой обработки изображений. По существу, за методами улучшения изображений стоит идея выявления плохо различимых деталей

или просто подчеркивания интересующих характеристик на исходном изображении. Известным примером улучшения является усиление контраста изображения, потому что в результате «оно выглядит лучше». Важно иметь в виду, что улучшение качества – весьма субъективная область в обработке изображений.

Восстановление изображений – это область, также связанная с повышением визуального качества изображения, однако, в отличие от собственно улучшения, критерии которого субъективны, восстановление изображения является объективным в том смысле, что методы восстановления изображений опираются на математические или вероятностные модели искажений изображения. Напротив, улучшение изображений основано на субъективных предпочтениях человеческого восприятия, которые связаны с тем, что именно считается «хорошим» результатом улучшения.

Обработка цветных изображений приобрела особую важность в связи со значительным расширением использования цветных изображений в технологических областях.

Сжатие, как следует из самого названия, относится к методам уменьшения объема памяти, необходимого для хранения изображения, или сужения полосы пропускания канала, требуемой для его передачи.

Морфологическая обработка связана с инструментами для извлечения таких компонент изображения, которые могут быть полезны для представления и описания формы.

Сегментация разделяет изображение на составные части или объекты. В целом автоматическая сегментация принадлежит к числу самых трудных задач цифровой обработки изображений. С одной стороны, излишне подробная сегментация уводит процесс решения задачи обработки изображения на сложный путь, если требуется идентифицировать объекты по отдельности. С другой стороны, недостаточно подробная или же ошибочная сегментация почти неизбежно приведет к возникновению ошибок на финальной стадии обработки. В общем, чем точнее сегментация, тем больше шансов на успех при распознавании.

Распознавание образов (изображений) – это процесс отнесения исходных данных к определенному классу с помощью выделения существенных признаков, характеризующих эти данные.

Несмотря на многочисленные возможные способы регистрации изображений, задача обработки всегда одна и та же: сформировать цифровое изображение на основе данных, воспринимаемых чувствительными элементами. От большинства сенсоров поступает аналоговый выходной сигнал в форме непрерывно меняющегося напряжения, форма и амплитуда которого связаны с регистрируемым физическим явлением.

Чтобы получить цифровое изображение, необходимо преобразовать непрерывно поступающий сигнал в цифровую форму. Эта операция включает в себя два процесса – дискретизацию и квантование.

Дискретизация – это преобразование непрерывного сигнала в последовательность чисел (отсчетов).

Квантование (англ. quantization) – разбиение диапазона отсчетных значений сигнала на конечное число уровней и округление этих значений до одного из двух ближайших к ним уровней. При этом значение сигнала может округляться либо до ближайшего уровня, либо до меньшего или большего из ближайших уровней в зависимости от способа кодирования (рис. 2).

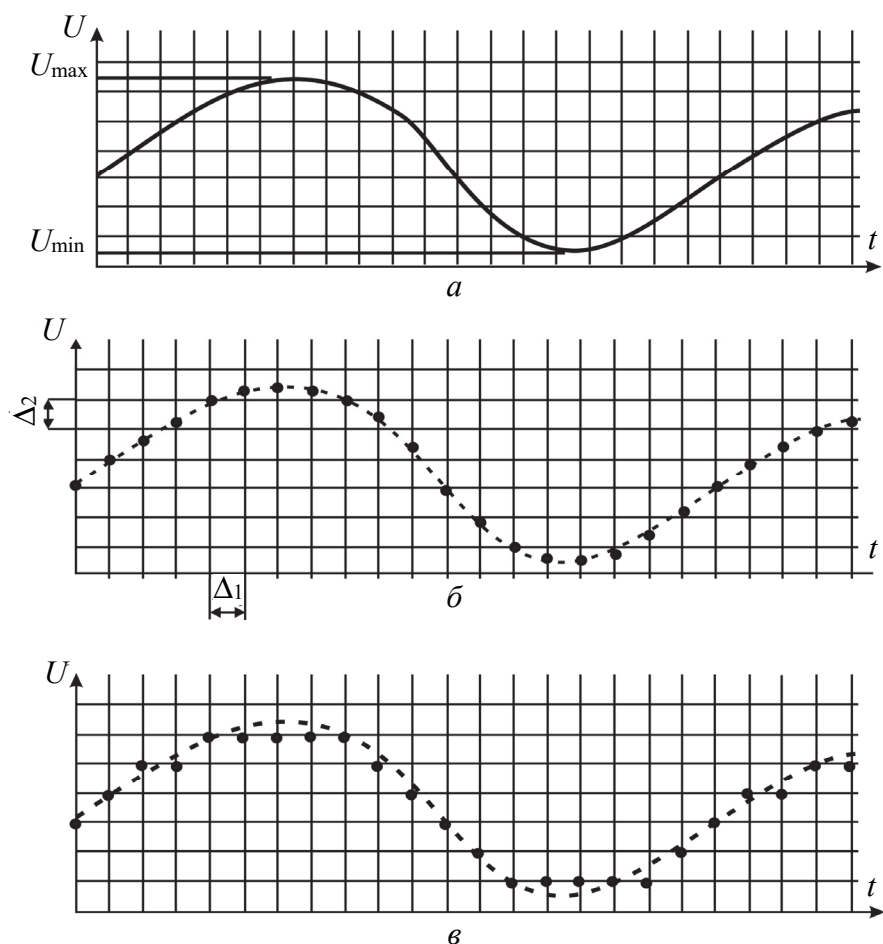


Рис. 2. Преобразование аналогового сигнала в цифровой:

a – аналоговый сигнал; $б$ – дискретный по времени

и аналоговый по амплитуде сигнал;

$в$ – дискретный по времени

и квантованный по амплитуде сигнал

(горизонтальные линии на сетке – уровни квантования;

вертикальные – моменты взятия отсчетов)

В случае регистрации изображения по обоим направлениям дискретизация и квантование выглядят следующим образом (рис. 3).

В результате операций дискретизации и квантования возникает матрица действительных чисел. В данном случае используется основной способ представления цифровых изображений. Предположим, что в результате дискретизации изображения (x, y) получена матрица из M строк и N столбцов. Координаты (x, y) становятся теперь *дискретными значениями*. Для ясности обозначений и большего удобства мы будем применять для этих дискретных координат целочисленные значения, принимая за начало координат левый верхний угол изображения, где $(x, y) = (0, 0)$. Следующим значением координат вдоль первой строки изображения будет точка $(x, y) = (0, 1)$. Важно иметь в виду, что обозначение $(0, 1)$ используется лишь для указания на второй отсчет в первой строке и не означает, что это фактические значения физических координат точек дискретизации.

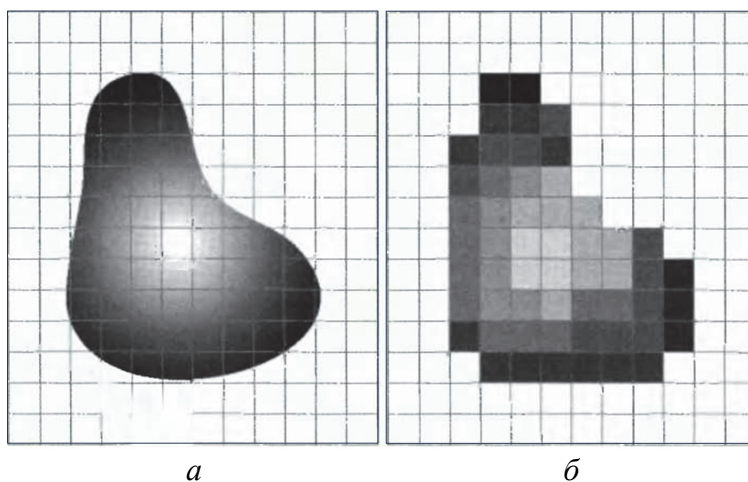


Рис. 3. Результат дискретизации (*а*) и квантования (*б*)

Яркостным (или *полутоновым*) *разрешением* называется мельчайшее различимое изменение яркости, но процесс измерения различных уровней яркости является субъективным. Если при дискретизации изображений имеется относительно большая свобода действий при выборе числа отсчетов (т. е. частоты дискретизации), то при установлении числа градаций яркости приходится в значительной степени учитывать особенности аппаратуры; по этим причинам число градаций обычно выбирается равным степени 2. Наиболее частым решением является выбор 8-битного представления (256 градаций яркости), но в некоторых приложениях используется 16 бит, если необходимо иметь более точное представление полутонов.

ГЛАВА 3

БИНАРНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Поскольку изображения содержат большой объем информации, важную роль начинают играть вопросы ее представления. Покажем, что интересующие нас геометрические характеристики можно извлечь из проекций бинарных изображений. Проекции гораздо легче хранить и обрабатывать. Также рассмотрим непрерывные бинарные изображения, характеристическая функция которых равна нулю или единице в каждой точке плоскости изображения. Это упрощает анализ, однако при использовании ЭВМ изображение необходимо разбить на дискретные элементы.

Начнем со случая, когда в поле зрения находится объект, а все остальное считается фоном. Если объект оказывается заметно темнее (или светлее), чем фон, то легко определить функцию $b(x, y)$, которая называется характеристической и которая равна нулю для всех точек изображения, соответствующих фону, и единице для точек на объекте или наоборот.

Поскольку количество информации, содержащейся в бинарном изображении, на порядок меньше, чем в совпадающем с ним по размерам полутоновом изображении, бинарное изображение легче обрабатывать, хранить и пересылать. Естественно, определенная часть информации при переходе к бинарным изображениям теряется, и, кроме того, сужается круг методов обработки таких изображений. В настоящее время существует достаточно полная теория того, что можно и чего нельзя делать с бинарными изображениями, чего, к сожалению, нельзя сказать о полутоновых изображениях.

Как определить положение объекта на изображении? Поскольку объект, как правило, состоит не из одной-единственной точки, мы должны четко определить смысл термина «положение». Обычно в качестве характерной точки объекта выбирают его *геометрический центр*.

Геометрический центр – это центр масс однородной фигуры той же формы. Данный термин подробно рассмотрен в курсе теоретической механики. В свою очередь центр масс определяется точкой, в которой можно сконцентрировать всю массу объекта без изменения его первого момента относительно любой оси. Более понятной

интерпретацией является представление о том, что вы имеете однородный металлический лист неправильной формы и вы находите точку, установив на которую упор, лист будет находиться в равновесии.

Мы также хотим определить, как расположен объект в поле зрения, т. е. его ориентацию. Сделать это несколько сложнее. Допустим, что объект немного вытянут вдоль некоторой оси; тогда ее ориентацию можно принять за ориентацию объекта. Как точно определить ось, вдоль которой вытянут объект? Обычно выбирают ось минимального второго момента. Она представляет собой двумерный аналог оси наименьшей инерции. Для этого воспользуемся следующим утверждением. В любом теле существуют три взаимно перпендикулярные свободные оси, которые пересекаются в центре масс. В общем случае момент инерции относительно одной из них максимальный, относительно другой – минимальный, а относительно третьей имеет промежуточное значение.

Можно показать, что в качестве очень грубого эмпирического правила можно считать, что минимальное пространственное и яркостное разрешение, при котором цифровое изображение будет относительно свободным от дефектов типа ложных контуров и ступенчатости, составляет около 256×256 пикселей с 64 градациями яркости.

Обсуждение операций дискретизации и квантования изображений закончим кратким рассмотрением способов увеличения и уменьшения цифровых изображений. Эта тема связана с дискретизацией и квантованием, поскольку увеличение может рассматриваться как повышение частоты дискретизации, а уменьшение – как понижение этой частоты. Главное отличие обсуждаемых операций от дискретизации и квантования исходного непрерывного изображения состоит в том, что они применяются к *цифровому*, т. е. ранее уже дискретизированному изображению.

Для увеличения необходимы два шага: создание новой матрицы пикселей и затем присвоение этим новым пикселям определенных значений яркости. Начнем с простого примера. Предположим, что имеется изображение размером 500×500 пикселей, которое мы хотим увеличить в 1,5 раза, до размеров 750×750 пикселей. По идее, простейший способ визуально наблюдать увеличение – это наложить на исходное изображение воображаемую сетку размером 750×750 элементов. Очевидно, что шаг сетки будет меньше одного пикселя исходного изображения. Чтобы присвоить значение яркости любому элементу наложенного изображения, найдем ближайший к нему пиксель исходного изображения и припишем его яркость данному

элементу сетки. Пролодав аналогичную операцию для всех элементов сетки, получим искомое увеличенное изображение. Такой способ присвоения значений яркости называется *интерполяцией по ближайшему соседу*. Хотя увеличение с интерполяцией по ближайшему соседу выполняется быстро, оно имеет ту нежелательную особенность, что может приводить к заметной ступенчатости.

Немного более сложным способом присвоения яркостей элементам увеличенного изображения является билинейная интерполяция, в которой используются четыре ближайших соседа данной точки.

Уменьшение изображений осуществляется способами, аналогичными вышеизложенным для увеличения, но вместо операции дублирования строк и столбцов пикселей используются операции выбрасывания строк и столбцов. Например, для уменьшения изображения в 2 раза выбрасываются строки и столбцы через один. Для иллюстрации принципов уменьшения изображения в нецелое число раз мы можем воспользоваться той же аналогией с наложенной на исходное изображение сеткой, но с той лишь разницей, что шаг сетки теперь оказывается больше размера исходного пикселя. Для назначения яркости элементам уменьшенного изображения применяются те же методы, а именно интерполяция по ближайшему соседу или билинейная интерполяция.

ГЛАВА 4

МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Множество подходов к улучшению изображений распадается на две большие категории: методы обработки в пространственной области (пространственные методы) и методы обработки в частотной области (частотные методы). Термин «пространственная область» относится к плоскости изображения как таковой, и данная категория объединяет подходы, основанные на прямом манипулировании пикселями изображения. Методы обработки в частотной области основываются на модификации сигнала, формируемого путем применения к изображению преобразования Фурье. Возможна также и комбинация этих двух подходов.

Общей теории улучшения изображений не существует. Когда изображение обрабатывается для визуальной интерпретации, наблюдатель является окончательным судьей того, насколько хорошо действует конкретный метод. Визуальное оценивание качества изображения есть крайне субъективный процесс, делающий тем самым понятие «хорошего изображения» некоторым неуловимым эталоном, с помощью которого необходимо сравнивать эффективность алгоритма. Когда целью является обработка изображения для машинного восприятия, задача оценивания несколько проще. Например, в задаче распознавания символов наилучшим (оставляя в стороне другие вопросы, такие как вычислительные требования) будет тот метод обработки изображений, который дает более точные результаты машинного распознавания. Тем не менее даже в ситуации, когда задача позволяет установить четкие критерии качества, обычно требуется определенное количество попыток тестирования, пока будет выбран конкретный подход к улучшению изображений.

Процессы пространственной обработки описываются уравнением

$$g(x, y) = T[f(x, y)], \quad (1)$$

где $g(x, y)$ – обработанное изображение; T – оператор над f , определенный в некоторой окрестности точки (x, y) ; $f(x, y)$ – входное изображение.

На рис. 4 показана основная идея пространственного преобразования. Точка входного изображения помещается в квадратную или прямоугольную матрицу. Передвижение этой матрицы осуществляется, как показано, справа налево, и при этом происходит изменение яркости пикселя согласно оператору T .

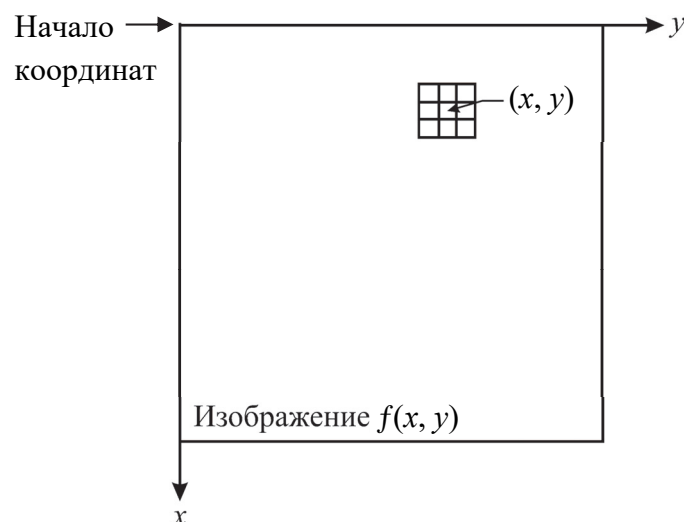


Рис. 4. Окрестность 3×3 вокруг точки (x, y) изображения

Рассмотрим простой пример. Эффект преобразования заключается в получении изображения более высокого контраста по сравнению с оригиналом, для этого затемняют пиксели со значениями, меньшими m , и повышают яркости пикселей со значениями, большими m на исходном изображении.

Оператор может иметь такой вид, который в предельном случае дает в результате двухградационное (бинарное) изображение.

Представленный пример относится к так называемым градационным преобразованиям, при помощи которых могут быть построены некоторые довольно простые, но действенные методы обработки изображений. Поскольку результат улучшения каждого элемента изображения зависит только от яркости этого же элемента, методы данной категории часто относят к процедурам поэлементной обработки.

Для практических целей вводится понятие так называемых масок, также упоминаемых в литературе как фильтры, ядра, шаблоны или окна. Чаще всего маска представляет собой небольшой (скажем, 3×3 элемента) двумерный массив, который накладывается на изображение, и при этом осуществляется умножение элементов маски фильтра и соответствующих элементов изображения с последующей обработкой результата в виде вывода нового изображения.

Сглаживающие пространственные фильтры. Сглаживающие фильтры используются для расфокусировки (размытия) изображения и подавления шума. Расфокусировка может применяться как предварительный шаг обработки изображения, например, для удаления мелких деталей перед обнаружением больших объектов либо же для устранения разрывов в линиях или деталях. При этом интенсивность

мелких объектов смешивается с фоном, в то время как большие объекты остаются в виде пятен и могут быть легко обнаружены (рис. 5).

Для подавления шумов может использоваться расфокусировка с применением как линейной, так и нелинейной фильтрации.

Выход (отклик) простейшего линейного сглаживающего пространственного фильтра есть среднее значение элементов по окрестности, покрытой маской фильтра. Такие фильтры иногда называют усредняющими. Главное использование сглаживающих фильтров состоит в подавлении «несущественных» деталей на изображении. Под «несущественными» здесь понимаются совокупности пикселей, которые малы по сравнению с размерами маски фильтра.

Следует подчеркнуть, что на практике иногда достаточно трудно заметить разницу между изображениями, сглаженными разными фильтрами или какими-то другими, аналогичными по конструкции фильтрами, поскольку размеры области, покрываемые маской при фильтрации одного элемента, очень малы.

Нелинейная фильтрация сводится к замещению исходного значения пикселя (в центре маски) на полученное значение отклика фильтра. Наиболее известен медианный фильтр, который, как следует из названия, заменяет значение пикселя значением медианы распределения яркостей всех пикселей в окрестности (включая и исходный). Медианные фильтры весьма популярны потому, что для определенных типов случайных шумов они демонстрируют отличные возможности подавления шума при значительно меньшем эффекте расфокусировки, чем у линейных сглаживающих фильтров с аналогичными размерами. В частности, медианные фильтры эффективны при фильтрации импульсных шумов, иногда называемых шумами «соль и перец», которые выглядят как наложение на изображение случайных черных и белых точек. Вы увидите такую опцию при подробном рассмотрении программы ImageJ.

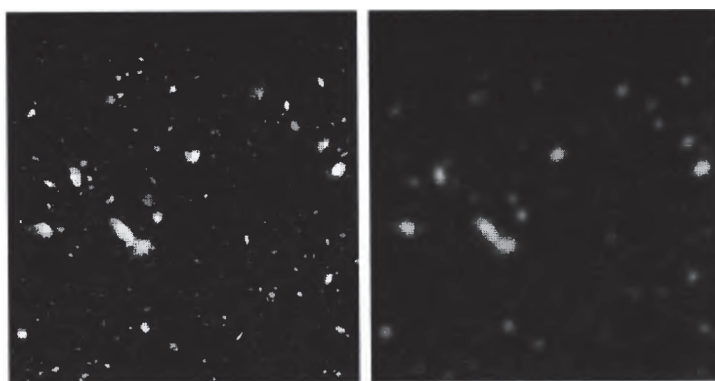


Рис. 5. Пример расфокусировки

В этой же программе вы обнаружите фильтры, которые полезны при поиске на изображении наиболее ярких точек по отношению к окружающему фону.

Пространственные фильтры повышения резкости необходимы, чтобы подчеркнуть мелкие детали изображения или улучшить те детали, которые оказались расфокусированы вследствие ошибок или несовершенства самого метода съемки.

Ранее было показано, что расфокусировка изображения может быть достигнута пространственной операцией усреднения значений точек по окрестности. Поскольку усреднение аналогично интегрированию, то логично прийти к выводу, что повышение резкости, будучи явлением, обратным по отношению к расфокусировке, может быть достигнуто пространственным дифференцированием.

Поскольку изображение – по сути, дискретная функция, то производные дискретной функции определяются в терминах разностей. Эти разности можно задать различными способами, однако мы будем руководствоваться следующим. Первая производная должна быть:

- 1) равной нулю на плоских участках (областях с постоянным уровнем яркости);
- 2) ненулевой в начале и в конце ступеньки или склона яркости;
- 3) ненулевой на склонах яркости.

Аналогично вторая производная должна быть:

- равной нулю на плоских участках;
- ненулевой в начале и в конце ступеньки или склона яркости;
- равной нулю на склонах постоянной крутизны.

Пропуская математическую часть вопроса, которая связана с оператором Лапласа (∇^2), мы, тем не менее, отметим, что оператор Лапласа можно представить как меру «кривизны» функции. Если значение функции в точке выше среднего, это может указывать на «выпуклость», а если ниже – на «вогнутость». Далее продемонстрируем соответствующее выражение, которое хотя бы внешним видом поясняет сказанное:

$$g(x, y) = \begin{cases} f(x, y) - \nabla^2 f(x, y), & \text{если } w(0, 0) < 0, \\ f(x, y) + \nabla^2 f(x, y), & \text{если } w(0, 0) \geq 0, \end{cases} \quad (2)$$

где $w(0, 0)$ – значение центрального коэффициента маски лапласиана. Реальное воплощение этого приема вы увидите в одном из плагинов ImageJ под названием Mexican Hat.

Приведем еще один пример, известный из фотографии, где для получения более резкого отпечатка на негатив накладывался

расфокусированный позитив, и экспозиция осуществлялась через полученный двухслойный оригинал. Процедура была перенесена в полиграфию и много лет используется в данной отрасли для повышения резкости изображений и заключается в вычитании из изображения его расфокусированной копии. Эта процедура, называемая нерезким маскированием, выражается формулой

$$f_s(x, y) = f(x, y) - \bar{f}(x, y), \quad (3)$$

где $f_s(x, y)$ обозначает изображение с повышенной резкостью, полученное нерезким маскированием; $\bar{f}(x, y)$ – расфокусированная копия исходного изображения $f(x, y)$.

Частотные методы обработки изображений базируются на преобразовании Фурье. Хотя в технических учреждениях высшего образования изучают ряды Фурье и иногда и преобразование Фурье, связь между изображением и этими понятиями часто остается чистой абстракцией. Поэтому напомним, что понятие ряда Фурье заключается в том, что любая функция, периодически воспроизводящая свои значения, может быть представлена в виде суммы синусов и/или косинусов различных частот, умноженных на некоторые коэффициенты. Сложность поведения функции при этом не имеет значения. Итак, если только функция является периодической и удовлетворяет некоторым математическим условиям, она может быть представлена в виде вышеуказанной суммы (рис. 6).

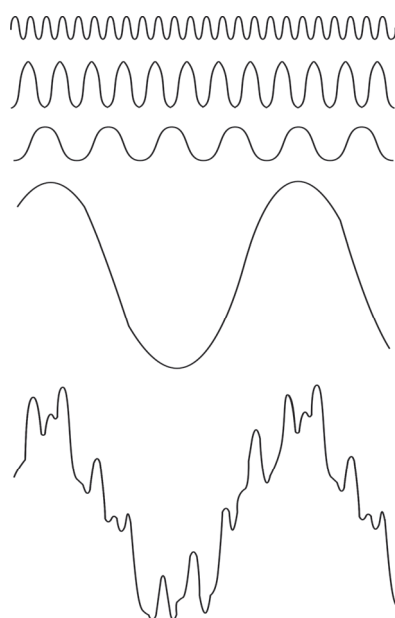


Рис. 6. Графическая иллюстрация ряда Фурье.
Нижняя функция – сумма четырех
расположенных над ней функций

Важным практическим выводом из ряда Фурье следует, что, добавляя, а самое главное, удаляя некоторые составляющие из тригонометрической суммы, можно влиять на вид одномерной суммарной кривой. Если некоторые виды колебаний являются «паразитными», можно «очистить» результирующую кривую. Для практической реализации такого подхода служат Фурье-преобразования.

В Фурье-преобразовании используется понятие «спектр». Поясним на популярном примере. Рассмотрим синусоидальную функцию, которая описывает гармоническое колебание. Общая форма такой функции выглядит следующим образом:

$$y(t) = A \sin(2\pi f t + \varphi), \quad (4)$$

где A – амплитуда (максимальное значение колебания); f – частота (количество колебаний в секунду); t – время; φ – фаза (начальное смещение).

Когда мы применяем преобразование Фурье к этой функции, то получаем спектр частот, который показывает, какие частоты присутствуют в сигнале и с какой амплитудой. Для синусоидальной функции, как в нашем примере, преобразование Фурье будет представлять собой два пика: один на частоте $f = 1$ Гц с амплитудой $A = 1$ и другой на частоте $f = -1$ Гц (из-за симметрии).

Полезная аналогия возникает при сравнении преобразования Фурье со стеклянной призмой. Призма представляет собой физический прибор, который разлагает свет на различные цвета в зависимости от длины (частоты) электромагнитных волн его составляющих. Преобразование Фурье можно представлять себе как своего рода «математическую призму», которая также разделяет функцию на различные составляющие в зависимости от ее «частотного содержания». Рассматривая свет, мы говорим о его спектральном составе. Аналогично преобразование Фурье позволяет нам описать функцию с помощью совокупности составляющих ее частот. Подставляя по ходу лучей вторую призму, можно собрать все лучи обратно.

Пара двух интегральных выражений, которые мы здесь не приводим, составляют пару преобразований Фурье. Первая из них создает образ Фурье-преобразования, далее, зная Фурье-образ, можно получить исходную функцию – обратное преобразование. Единственным моментом, на который следует обратить внимание, является тот факт, что используемые функции содержат комплексные числа, так как они позволяют хранить больше информации о сигнале. Указанные преобразования можно легко распространить на функции

двух переменных. Достаточно интересно выглядит результат преобразования в виде изображения (рис. 7).

Основными функциями Фурье-преобразования являются:

- анализ сигналов. Позволяет исследовать, какие частоты доминируют в сигнале. Это полезно в таких областях, как обработка звука, изображений и электроники;
- удаление шума. С его помощью можно выделять полезные сигналы, отвергая нежелательные шумы, которые находятся вне определенных частотных диапазонов;
- изучение временных рядов. В экономике и финансах Фурье-преобразование помогает выявлять циклы и сезонные колебания в ряде данных.

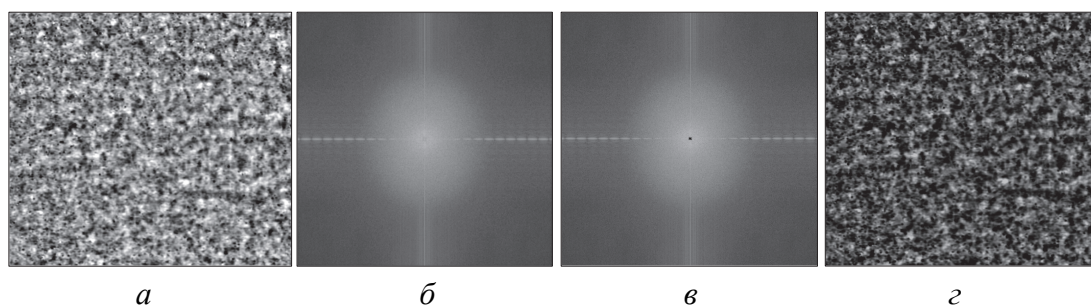


Рис. 7. Исходное изображение поверхности бумаги (а), ее Фурье-образ (б), скорректированный Фурье-образ (в) и конечный результат после Фурье-преобразования (г)

Удаление шума из двумерных изображений с использованием Фурье-преобразования – это распространенный метод в обработке изображений. Данный процесс включает преобразование изображения в частотную область, где шумы могут быть легко идентифицированы и удалены. Вот как это происходит по шагам.

Шаг 1: Преобразование изображения.

1. Загрузка изображения, у которого вы хотите удалить шум.
2. Применение двумерного Фурье-преобразования. Двумерное Фурье-преобразование (2D-Фурье-преобразование) преобразует каждую точку изображения (пиксель) из пространственной области в частотную область. В результате вы получите спектр частот, где каждая точка на новом изображении представляет собой амплитуду и фазу определенной частоты в исходном изображении (см. рис. 7).

Шаг 2: Анализ частотной области.

1. Частотный спектр. После применения Фурье-преобразования вы получите частотный спектр изображения. В этом спектре:
 - низкие частоты обычно соответствуют общим, плавным изменениям в изображении (например, фоны или большие структуры);

– высокие частоты соответствуют резким изменениям (например, края, текстуры и шум).

2. Идентификация шума. Шумы чаще всего находятся в высокочастотной области спектра. Это может быть случайный шум, появляющийся в изображении, или регулярные шумовые характеристики.

Шаг 3: Удаление шума.

1. Фильтрация частот. Применяются фильтры (обычно полосовые или низкочастотные) для удаления нежелательных высокочастотных составляющих.

Например, если используется низкочастотный фильтр, он пропускает низкие частоты и подавляет высокие, позволяя удалить шум, сохраняя при этом основные структуры изображения.

Существуют разные типы фильтров:

- низкочастотные фильтры (например, гауссовый фильтр) улучшают гладкость изображения, подавляя резкие изменения (шум);
- высокочастотные фильтры могут быть применены для выделения краев, но в данном случае они не используются, если цель – удалить шум.

2. Настройки фильтров. Задаются параметры фильтра, такие как радиус, в пределах которого высокие частоты будут подавлены. Цель – найти баланс между удалением шума и сохранением важных деталей изображения.

Шаг 4: Обратное преобразование.

1. Обратное Фурье-преобразование. После фильтрации следует вернуться в пространственную область, применив обратное Фурье-преобразование (Inverse Fourier Transform). Это преобразование преобразует отфильтрованную частотную информацию обратно в форму изображения.

2. Получение очищенного изображения. После выполнения обратного преобразования получается изображение, из которого был удален шум, при этом изображение осталось более четким и гладким.

Шаг 5: Оценка результатов.

1. Сравнение изображений. Сравните оригинальное изображение с очищенным, чтобы оценить эффективность удаления шума.

2. Дополнительная обработка. Если шум все еще наблюдается, вы можете повторить процесс с другими параметрами фильтрации или использовать другие методы.

Удаление шума с использованием Фурье-преобразования является мощным методом, который крайне полезен в обработке изображений. Эта методика позволяет эффективно изолировать и удалять

нежелательные высокочастотные компоненты, сохраняя при этом важные характеристики и детали изображения.

Кроме рассматриваемых здесь программ JMicroVision и ImageJ имеются менее известные продукты, которые также используют преобразование Фурье, – GIMP (бесплатное приложение) и Python с библиотеками NumPy и SciPy.

Восстановление изображений. Как и при улучшении изображений, конечной целью восстановления является повышение качества изображения в некотором заранее определенном смысле. Несмотря на пересечение областей применения методов обоих классов, улучшение изображений является в большей степени субъективной процедурой, в то время как процесс восстановления носит в основном объективный характер. При восстановлении делается попытка реконструировать или воссоздать изображение, которое было до этого искажено, используя априорную информацию о явлении, которое вызвало ухудшение изображения. Поэтому методы восстановления основаны на моделировании процессов искажения и применении обратных процедур для воссоздания исходного изображения.

Мы совершенно не уверены, что методы улучшения изображений пригодны для анализа бумаги. Это связано с тем, что шум, обусловленный условиями фиксации и обработки изображения, сопоставим с естественным шумом, возникающим при получении бумажного листа. Тем не менее мы кратко остановимся также без использования математического аппарата на приемах восстановления изображения.

Фактически методы восстановления условно базируются на фильтрах, в работу которых заложены различные интерполяционные алгоритмы. Проблема восстановления заключается в поиске искажающей функции. Наиболее простым примером такого подхода является медианный фильтр. В этом методе значение пикселя заменяется медианой найденных пикселей в соседней области. Ясно, что возникают проблемы на краях изображения, где не существует соседних пикселей с края.

Метод максимума, или фильтр максимума, используется для подавления шума, который может находиться ниже уровня максимальных значений окрестности пикселя. Этот метод заменяет пиксель на его максимальное значение в окрестности пикселя, а окрестность определяется размером окна, например, 3×3 . Применение этого метода件годно для удаления небольшого шума, при этом сохраняются яркие (светлые) детали.

Метод минимума, или фильтр минимума, напротив, используется для удаления светлых тонов или для выделения темных деталей на изображении.

Метод Гаусса основан на функции, которая похожа по форме на колокол. Эта функция показывает, как веса пикселей в окне зависят от расстояния до центрального пикселя. Пиксели, находящиеся ближе к центру, имеют больший вес, чем те, что находятся дальше. Такой фильтр удаляет высокочастотные компоненты (шум) и оставляет низкочастотные (структура). Этот метод сохраняет края лучше, чем многие другие методы.

Поскольку одним из параметров оценки неоднородности структуры бумаги считается дисперсия яркости, которая также является параметром оценки качества восстановления, то приемами восстановления необходимо пользоваться с осторожностью и по крайней мере параметры восстановления не следует менять произвольно, переходя от объекта к объекту.

ГЛАВА 5

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ЦВЕТА

В 1666 г. Исаак Ньютон обнаружил, что при прохождении луча солнечного света через стеклянную призму выходящий поток лучей не является белым, но состоит из непрерывного спектра цветов, простирающихся от фиолетового цвета на одном конце до красного на другом. Спектр белого света (видимый) может быть разделен на шесть широких цветовых диапазонов: фиолетовый, синий, зеленый, желтый, оранжевый и красный. При рассмотрении полного спектра видно, что ни один цветовой диапазон не имеет ярко выраженных границ; вместо этого каждый цвет плавно переходит в другой.

Цвет, воспринимаемый человеком как цвет объекта, определяется, по существу, характером отраженного от объекта света. Общеизвестно, что видимый свет составляет относительно узкую часть всего диапазона длин волн электромагнитного спектра. Тело, которое равномерно отражает свет во всем видимом диапазоне длин волн, выглядит для наблюдателя как белое. Однако тело, которое отражает свет преимущественно в некотором ограниченном диапазоне видимого спектра, приобретает некоторый цвет. Так, например, объект зеленого цвета отражает главным образом свет с длиной волны в диапазоне от 500 до 570 нм и поглощает большую часть энергии в диапазонах других длин волн.

Важную роль в науке о цвете играет выбор параметров, характеризующих свет. Когда свет является ахроматическим (неокрашенным, а точнее черно-белым с градациями), в роли единственной такой характеристики выступает интенсивность.

Хроматический (окрашенный) свет охватывает диапазон электромагнитного спектра приблизительно от 400 до 700 нм. Хроматические источники света характеризуются тремя основными величинами: потоком лучистой энергии, световым потоком и светлотой. Поток лучистой энергии, обычно измеряемый в ваттах (Вт), – это общее количество энергии, излучаемой источником света в единицу времени. Световой поток, измеряемый в люменах (лм), – это поток лучистой энергии, оцениваемой по зрительному ощущению. Например, световой источник, работающий в дальнем инфракрасном диапазоне, может

давать значительный поток энергии, но наблюдатель его практически не ощущает, так что световой поток такого источника почти равен нулю. Наконец, как уже обсуждалось ранее, светлота (яркость) является субъективной характеристикой, которая практически не поддается измерению. Она отражает уровень зрительного ощущения, производимого интенсивностью (т. е. световым потоком), и является одним из ключевых параметров для описания цветового восприятия.

Человеческий глаз воспринимает цвета как различные сочетания так называемых первичных основных цветов: красного (R), зеленого (G) и синего (B). В 1931 г. Международная комиссия по освещению (МКО) разработала стандартный набор монохроматических первичных основных цветов: синий – с длиной волны 435,8 нм, зеленый – 546,1 нм и красный – 700 нм. Этот стандарт был установлен до того, как в 1965 г. стали доступны кривые спектральной чувствительности. Поэтому стандарт МКО лишь приблизительно соответствует экспериментальным данным. Никакой монохроматический цвет в отдельности не может быть назван красным, зеленым или синим. Кроме того, важно понимать, что наличие стандартного набора монохроматических первичных основных цветов не означает, что все цвета спектра могут быть получены на основе этих фиксированных RGB-цветов. Использование термина «основные» часто приводит к тому заблуждению, что все видимые цвета могут быть воспроизведены при смешении основных первичных цветов в различных пропорциях. Такое утверждение не верно, за исключением того случая, когда длина волны основных цветов также может изменяться. В этом последнем случае, однако, мы уже не будем иметь трех стандартных первичных основных цветов.

Первичные основные цвета могут складываться, что дает вторичные основные цвета: пурпурный (красный плюс синий), голубой (зеленый плюс синий) и желтый (красный плюс зеленый). Смешение трех первичных основных цветов, или вторичного основного цвета и противоположного ему первичного, в правильных пропорциях дает белый цвет.

Важно различать первичные основные цвета световых источников и первичные основные цвета красителей (светофильтров). В последнем случае первичный основной цвет определяется как цвет красителя, который поглощает или вычитает некоторый один первичный основной цвет светового источника и отражает либо пропускает два оставшихся. Поэтому для красителей первичными основными

цветами являются пурпурный, голубой и желтый, а вторичными – красный, зеленый и синий. Правильная комбинация трех первичных основных цветов красителей или вторичного основного цвета и противоположного ему первичного дает черный цвет.

Параметрами, обычно используемыми для различения цветов, являются светлота, цветовой тон и насыщенность. Как указывалось ранее, светлота связана со зрительным ощущением интенсивности в цветовом случае. Цветовой тон характеризует доминирующий цвет, воспринимаемый наблюдателем, причем большинство цветовых тонов в своем восприятии эквивалентны тому или иному спектральному цвету. Таким образом, когда мы называем некоторый объект красным, оранжевым или желтым, мы тем самым обозначаем его цветовой тон. Насыщенность цвета связана с его относительной белизной, или с количеством белого цвета в нем. Спектрально чистые (монохроматические) цвета являются полностью насыщенными. Насыщенный цвет не разбеливается. Такие цвета, как розовый (смесь красного и белого) или бледно-лиловый (смесь фиолетового и белого), менее насыщены, причем величина насыщенности цвета обратно пропорциональна количеству белого цвета в смеси.

Цветовой тон и насыщенность вместе называются цветностью, и поэтому цвет может быть охарактеризован своей светлотой и цветностью. Величины красного, зеленого и синего, необходимые для получения некоторого конкретного цвета, называются координатами цвета и обозначаются соответственно X , Y и Z . Часто при описании цвета светлота не представляет интереса, и в таком случае цветовой тон и насыщенность можно выразить в координатах цветности, которые для x определяются так:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}. \quad (5)$$

Другой способ задавать цвета основан на использовании диаграммы цветностей МКО (рис. 8), на которой вся совокупность цветов представлена как функция x (красной) и y (зеленой) координат цветности. Очевидно, что значение синей координаты получается вычитанием суммы красного и зеленого из единицы.

Диаграмма цветности полезна при рассмотрении процедуры смешения цветов, поскольку отрезок, соединяющий любые две точки диаграммы, определяет всевозможные различные цвета, которые могут быть получены при смешении двух данных цветов.

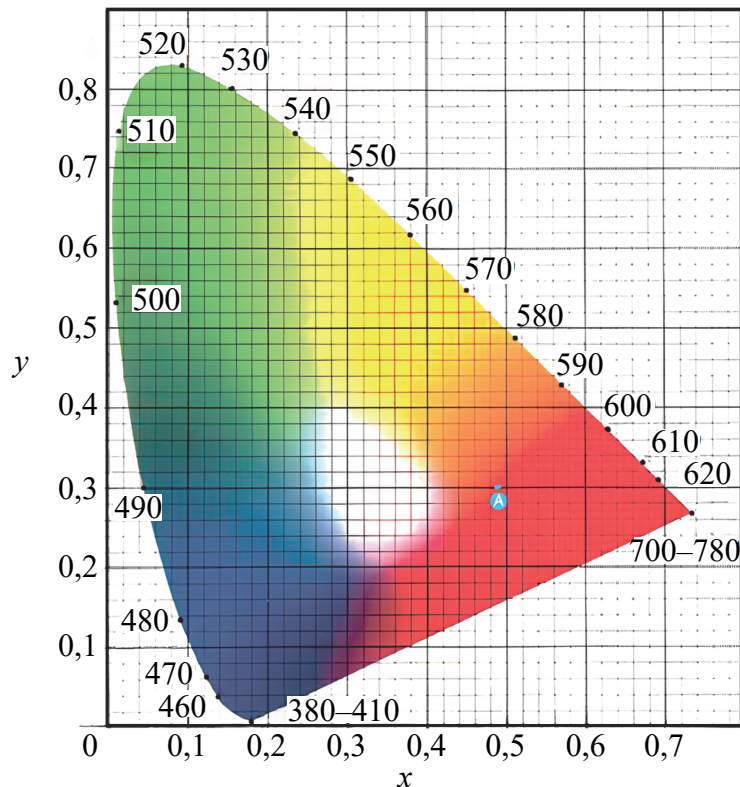


Рис. 8. Диаграмма цветности

Цветовые модели. Назначение цветовой модели (называемой также цветовым пространством или системой цветов) состоит в том, чтобы сделать возможным описание цветов некоторым стандартным, общепринятым образом. По существу, цветовая модель определяет некоторую систему координат и подпространство внутри этой системы, в которой каждому цвету соответствует единственная точка.

В *RGB-модели* каждый цвет представляется красным, зеленым и синим. Эти цвета называются первичными основными цветами (компонентами). В основе модели лежит декартова система координат. Цветовое пространство представляет собой куб. Точки, отвечающие красному, зеленому и синему цветам, расположены в трех вершинах куба, лежащих на координатных осях. Голубой, пурпурный и желтый цвета расположены в трех других вершинах куба. Черный цвет находится в начале координат, а белый – в наиболее удаленной от начала координат вершине.

В рассматриваемой модели оттенки серого цвета лежат на диагонали, соединяющей черную и белую вершины. Различные цвета в этой модели представляют собой точки на поверхности или внутри куба и определяются вектором, проведенным в данную точку из начала координат. Значения координат лежат между 0 и 255.

Цветовые модели СМУ и СМУК. Ранее уже говорилось, что голубой, пурпурный и желтый цвета являются вторичными основными цветами световых источников или первичными основными цветами красителей. Например, если поверхность, покрытая голубой краской, освещается белым светом, то красный цвет от такой поверхности не отражается. Таким образом, голубой краситель вычитает красный цвет из отражаемого белого, который сам по себе состоит из одинаковых количеств красного, зеленого и синего цветов. Значения координат лежат между 0 и 100.

Набор значений RGB может быть легко получен из значений СМУ вычитанием их из единицы. Возможен и противоположный переход. Цветовая модель СМУ используется в процессе получения печатных копий.

Цветовая модель Lab – сокращенное название цветового пространства CIE 1976 Lab* или CIELAB. В этой модели основными параметрами являются: уровень света – яркость L , а также координаты цвета от зеленого до красного – a и от голубого до желтого – b . Значения координат лежат для L в диапазоне 0–100, a и b – между –128 и +128.

Известен также и ряд других малораспространенных моделей. Для всех этих моделей характерно явление инвариантности, т. е. из одной модели можно получить любую другую. Хорошей иллюстрацией сказанного является программа Photoshop, наиболее распространенная у иллюстраторов и фотографов. На рис. 9 показан соответствующий скан.

<input checked="" type="radio"/> H:	217	°	<input type="radio"/> L:	44
<input type="radio"/> S:	64	%	<input type="radio"/> a:	-3
<input type="radio"/> B:	69	%	<input type="radio"/> b:	-46
<input type="radio"/> R:	64		C:	100 %
<input type="radio"/> G:	107		M:	67 %
<input type="radio"/> B:	176		Y:	9 %
#	406bb0		K:	0 %

Рис. 9. Перевод различных координат цветности программой Photoshop

Гистограммой изображения называют график распределения пикселей с определенной яркостью (светлотой), где на горизонтальной оси показывается яркость (от 0 до 255), а на вертикальной – количество пикселей заданной яркости. Например, на следующей гистограмме яркости (рис. 10) с уровнем 80 соответствует 1106 пикселей из 120 000.

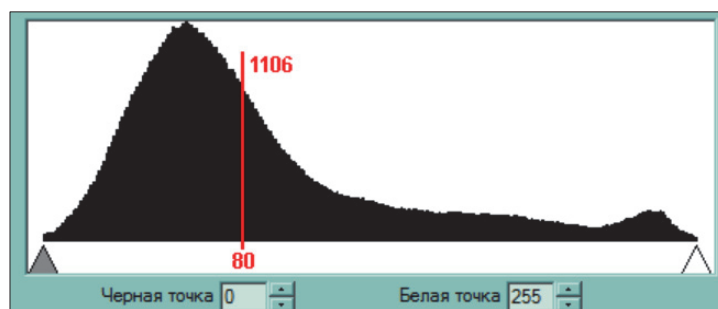


Рис. 10. Гистограмма изображения

Эквализация гистограммы. Эквализация гистограммы – это один из самых простых методов улучшения качества изображения. Эквализация – это процедура выравнивания гистограммы изображения путем коррекции яркости отдельных пикселей. Процедура эквализации делает распределение значений в гистограмме более равномерным, а это значит, что в ней почти не останется пропусков и областей с чрезмерно высоким количеством (и высотой) пиков. Рассмотрим две гистограммы и два изображения, соответствующих этим диаграммам (рис. 11).

В прикладных программах, которые мы изучаем ниже, достаточно найти соответствующую опцию, чтобы добиться увеличения контрастности. Существуют и другие способы использования гистограммы для увеличения контрастности, однако нет общих правил по выбору гистограммы, и следует раз за разом прибегать к анализу в каждой из задач улучшения и оценки изображений.

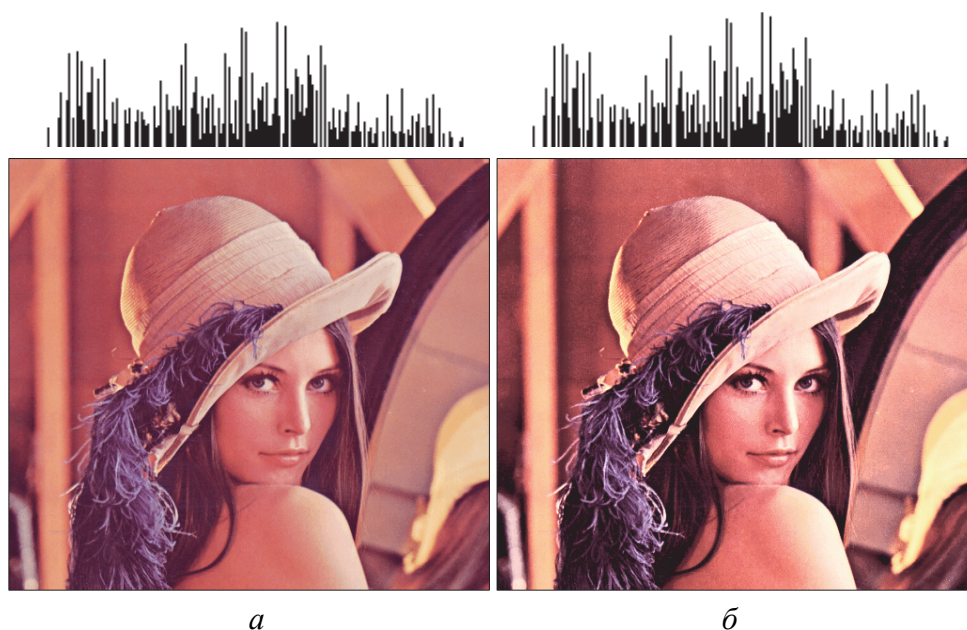


Рис. 11. Гистограммы и изображения до (а) и после (б) эквализации

Видно, что график стал более равномерным, локальные области максимальной плотности ярких участков исчезли и гистограмма немного выровнялась. В свою очередь, это привело к тому, что контраст некоторых областей стал сильнее и динамический диапазон изображения стал более насыщенным, а это означает, что качество изображения стало несколько выше.

Информационная энтропия. Вообще-то говоря, это понятие используется при оценке возможности сжатия изображения, так как определяет, какое количество информации мы можем потерять при такой процедуре. Однако информационная энтропия – это еще и мера неопределенности некоторой системы, мера ее дезорганизации.

Поскольку пиксели изображения являются случайными величинами, которые принимают значения в соответствии с некоторым распределением вероятностей P между 0 и 1, то формула для расчета энтропии примет следующий вид:

$$H = - \sum_{x=0}^{L-1} P(x) \log_2 P(x), \quad (6)$$

где L – значение пикселя, равного 256; $P(x)$ вычисляется через гистограммы путем ее нормировки.

Очевидно, что абсолютно однородное изображение имеет энтропию, равную нулю.

Элементы математического аппарата. Рассмотренная в настоящем учебно-методическом пособии программа ImageJ позволяет использовать некоторые элементы математического аппарата для цифровой обработки изображений. К ним мы относим арифметические и логические операции.

Арифметические операции над изображениями являются поэлементными операциями, т. е. они применяются к паре соответствующих пикселей двух изображений. Эти четыре арифметические операции (условно их можно назвать сложением, вычитанием, умножением, делением) обозначаются следующим образом:

$$\begin{aligned} s(x, y) &= f(x, y) + g(x, y); \\ d(x, y) &= f(x, y) - g(x, y); \\ p(x, y) &= f(x, y)g(x, y); \\ v(x, y) &= \frac{f(x, y)}{g(x, y)}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для изображения с яркостью в пределах 0–255 получение величины более 255 следует заменить на 255, а при получении отрицательного значения – на 0. Ясно, что s , d , p и v являются новыми изображениями. Заметим, что в такой определенной арифметике участвуют изображения одинаковых размеров.

Где мы можем применять эти арифметические операции? Оказывается, данный прием хорошо работает для удаления шума. Если предположить, что у нас имеется 100 изображений с одинаковым уровнем шума, то сложение таких изображений и получение среднего от него позволит уменьшить уровень шума в 10 раз.

Операция вычитания изображений часто используется для выделения имеющихся различий между ними. При этом, когда изображения визуально не отличаются, данная операция позволяет выделить мелкие детали, которые обычно не видны.

Важной областью применения операций умножения и деления изображений является выравнивание фона. Это очень ценный прием, так как при использовании оптических микроскопов, а также других методов просвечивания неравномерный фон искажает конечный результат. И хотя применение одного прибора в потоковых условиях совершенно не сказывается на конечном результате обработки, однако при переходе на другой прибор с другим неравномерным фоном такое сравнение некорректно.

Предположим, что система регистрации формирует цифровые изображения, которые можно смоделировать как произведение идеального изображения $f(x, y)$ и функции неравномерности фона $h(x, y)$, т. е. $g(x, y) = f(x, y) h(x, y)$. Сразу следует подчеркнуть, что приведенные рассуждения пригодны только для случая, когда речь идет о логарифмических величинах. Если изображение $h(x, y)$ известно, мы можем получить $f(x, y)$ путем умножения полученного изображения на обратное к $h(x, y)$, т. е. делением g на h . Если $h(x, y)$ неизвестно, но есть доступ к системе получения изображений, мы можем приближенно найти функцию неравномерности фона, получив изображение поля с постоянной яркостью. Даже если доступ к регистрирующей системе невозможен, часто можно оценить характер неравномерности фона непосредственно по изображению.

В случае, если значения яркости не прологарифмированы, то из значения фона необходимо вычесть значения яркостей итогового изображения.

Логические операции с изображениями. Известны четыре логические операции (рис. 12):

- объединение;
- пересечение;
- дополнение;
- разность двух множеств.

Затемненные области на рис. 12, б–д представляют собой элементы множеств, являющихся результатом указанной операции.

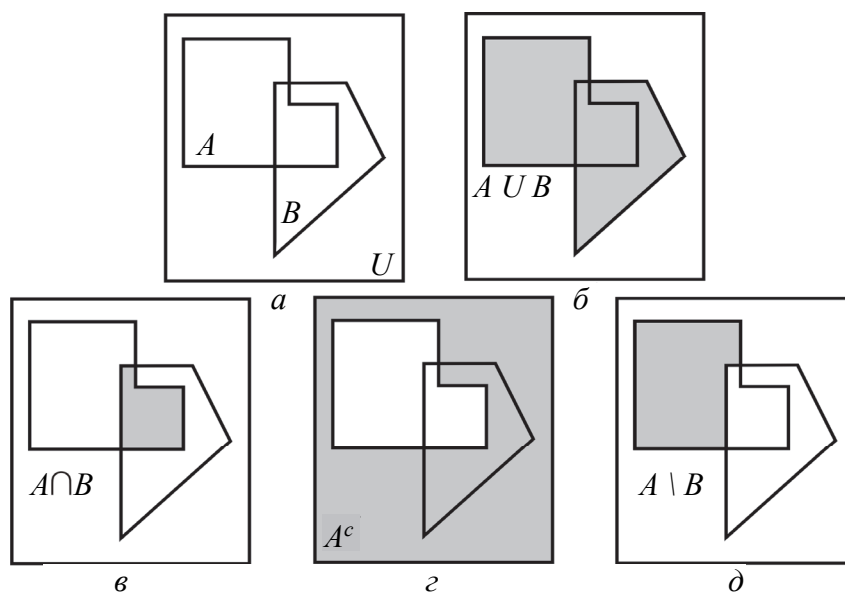


Рис. 12. Результаты логических операций с изображениями:

- а – два множества координат на плоскости A и B ;
- б – объединение множеств A и B ;
- в – пересечение множеств A и B ;
- г – разность множеств A и B ;
- д – дополнение множества A

В случае полутонов операции объединения и пересечения обычно определяются как соответственно максимум и минимум для пары соответствующих пикселей, а дополнение определяется как попарные разности между яркостью каждого пикселя.

Операция дополнение обычно используется для получения негатива при условии, что яркость внесена в матрицу как логарифмическая величина. В противном случае должно применяться вычитание. Обычно из 255 вычитается яркость каждого пикселя. Для облегчения многие мощные графические редакторы имеют опцию «Инверсия», и пользователь совершенно не задумывается, каким образом получается негатив.

Чаще всего логические преобразования типа ИЛИ, И, НЕ используются при работе с бинарными изображениями. Логические операции широко применяются при морфологической обработке изображений.

Нечеткие множества. Обычно логические результаты оперируют четкими понятиями в том смысле, что элемент либо принадлежит, либо не принадлежит множеству. В некоторых приложениях это сильно ограничивает возможности.

Рассмотрим простой пример. Предположим, что мы хотим поделить всех людей на две категории – молодых и немолодых. Применяя четкие множества, обозначим через U множество всех людей и пусть A – подмножество U , которое назовем множеством молодых людей. Чтобы задать множество A , необходима *функция принадлежности*, которая сопоставляет каждому человеку из U значение 0 или 1. Если элементу U сопоставлено значение 1, то этот элемент принадлежит A , и наоборот. Поскольку мы оперируем двужанной логикой, функция принадлежности просто задает порог для возраста, при котором (и меньших значениях) человек считается молодым, а выше которого – немолодым.

Допустим, что мы определили как молодых всех людей, имеющих возраст 20 лет и меньше. Сразу появляется трудность: человек, чей возраст составляет 20 лет и 1 секунду, не должен входить в множество молодых людей. Такое ограничение возникает вне зависимости от значения порога, принятого для классификации людей как молодых. Хотелось бы иметь более гибкое определение того, что подразумевается под «молодостью», т. е. иметь *постепенный переход* из молодых в немолодые. Теория нечетких множеств реализует эту идею с помощью функций принадлежности, которые постепенно меняются в интервале между граничными значениями 1 (определенно молодой) и 0 (определенно немолодой). С помощью нечетких множеств можно сделать утверждение, что некоторый человек на 50% молодой (находится в середине перехода от молодого к немолодому). Иначе говоря, возраст представляет собой неточное понятие, и нечеткая логика дает возможность работы с такими понятиями.

Рассмотрим обычную проблему повышения контрастов – одного из основных приложений из области яркостных преобразований. Можно сформулировать процесс повышения контрастов полутонового черно-белого изображения, используя следующие правила:

- 1) ЕСЛИ пиксель темный, ТО сделать его темнее;
- 2) ЕСЛИ пиксель серый, ТО сделать его серым;
- 3) ЕСЛИ пиксель светлый, ТО сделать его светлее.

Имея в виду, что это нечеткие термины, можно выразить концепции *темный*, *серый* и *светлый* при помощи функции принадлежности, показанной на рис. 13, а. В терминах выходного результата можно рассматривать термин *темнее* как означающий «иметь степень яркости в области более темных значений» (100% черный означает предельный уровень темного); термин *светлее* означает «иметь степень яркости в области более светлых значений» (100% белый является предельным значением светлого); *серый* означает «иметь степень яркости в области средних значений шкалы». Под степенью здесь понимается величина некоторой конкретной яркости; например, 80% черный является очень темным серым.

При модификации *константных яркостей* выходные функции принадлежности получают *одно значение*, т. е. также являются *константами* (рис. 13, б).

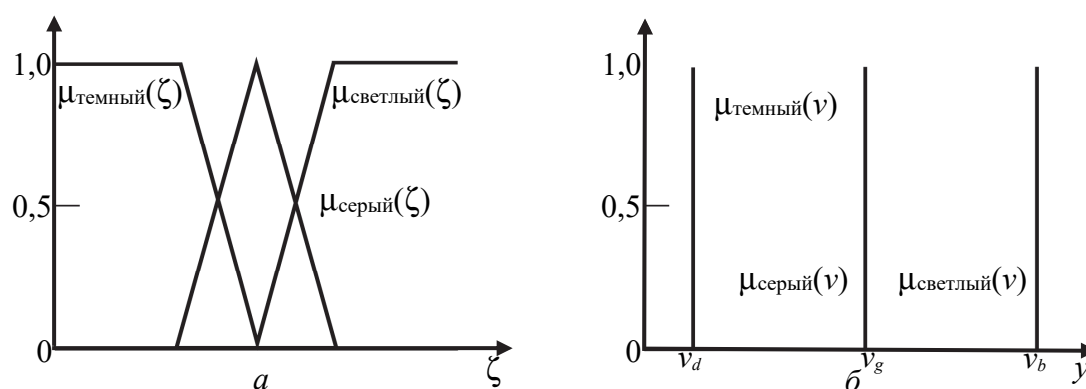


Рис. 13. Входная (а) и выходная (б) функции принадлежности для повышения контраста на основе правил нечеткой логики

Нечеткая обработка изображений требует интенсивных вычислений, поскольку весь процесс размывания, обработки исходных условий для всех правил, импликация, объединение и устранение нечеткости должны быть применены к каждому пикселю входного изображения.

На рис. 14, а представлено изображение с узким диапазоном яркостей, что приводит к впечатлению низкого контраста на изображении. В качестве базы для сравнения на рис. 14, б показан результат эквализации гистограммы. Как видно из рис. 14, б, растягивание диапазона усиливает контраст, однако в итоге значения пикселей оказываются в нижнем и верхнем концах шкалы яркостей, и изображение приобретает вид «переэкспонированного». В частности, детали на лбу и в волосах Альберта Эйнштейна по большей части утеряны. На рис. 14, в представлен результат модификации контраста на основе использования правил нечеткой логики.

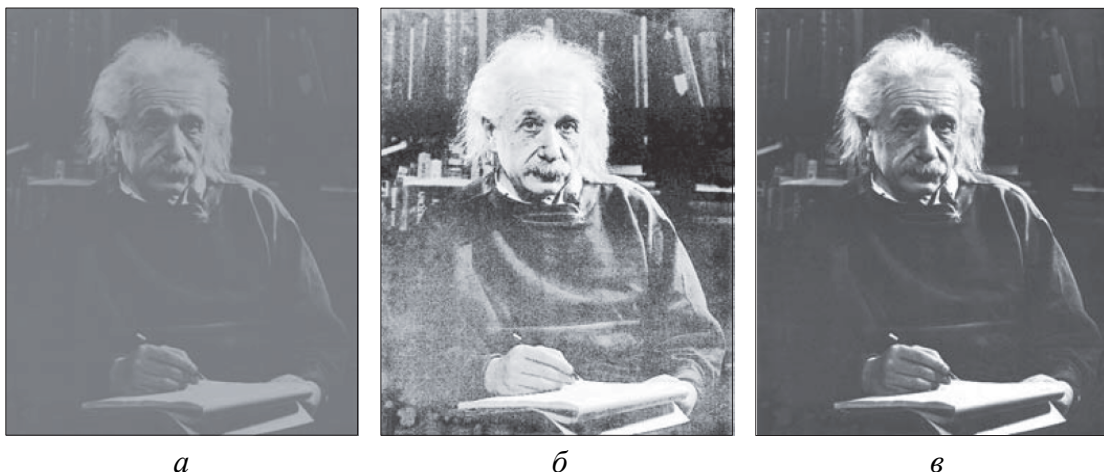


Рис. 14. Результат эквализации исходного малоcontrastного изображения (а) и результат эквализации гистограммы (б), а также применения метода повышения контраста, основанного на правилах нечеткой логики (в)

Кластеризация – это разбиение элементов некоторого множества на группы по принципу схожести (рис. 15). Фактически речь идет о сегментации изображений. Эти группы принято называть кластерами. Важным элементом этого приема является понятие меры близости, среди которой широко используется евклидово расстояние.

Метод k -средних – один из популярных итеративных методов кластеризации данных. Второй метод, не вникая в его сущность, мы затронем при описании программы ImageJ. Он быстр и эффективен в применении.

Рассмотрим алгоритм на примере растрового изображения. В качестве объектов будут выступать пиксели изображения, а в качестве характеристик – их цвет.

1. Выбирается число k – количество кластеров.
2. Далее случайным образом из заданного изображения выбирается k точек. На первом шаге эти точки будут считаться центрами кластеров. Каждому кластеру соответствует один центр.
3. Все точки изображения распределяются по кластерам. Вычисляется расстояние от любой точки до каждого центра кластера. Кластеризация изображения методом k -средних точку относит к тому кластеру, расстояние до центра которого будет наименьшим.
4. Когда все точки изображения распределены по кластерам, происходит пересчет центров кластеров. В качестве нового центра кластера берется среднее арифметическое всех точек, принадлежащих кластеру.

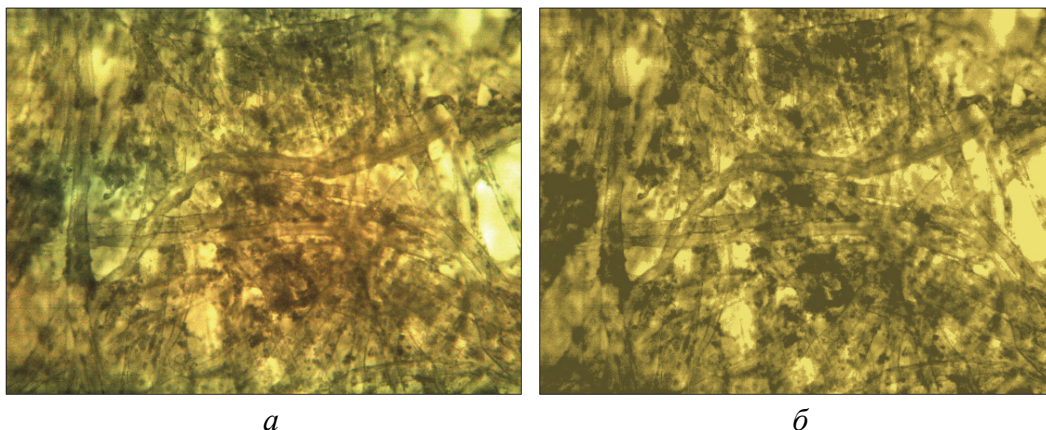


Рис. 15. Изображение бумаги «Снегурочка» до (а) и после (б) кластеризации (5 кластеров, 40 итераций)

Формат графического файла – это способ записи графических данных. Максимальная детализация графических данных происходит при создании файла изображения и не может быть увеличена при увеличении масштаба. Пиксели превращаются в расплывчатые квадраты (рис. 16).

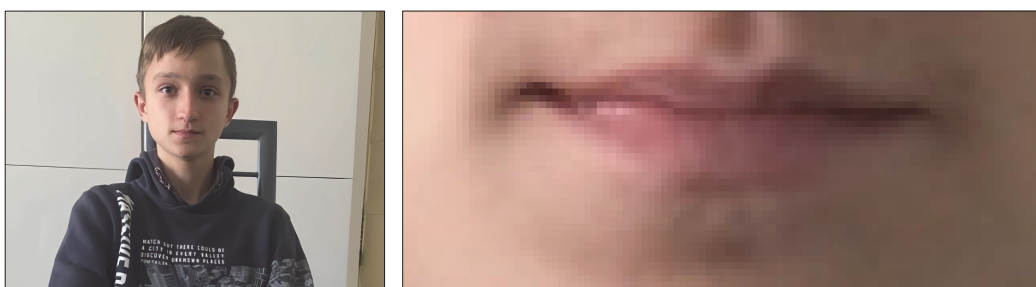


Рис. 16. Растровое изображение в двух масштабах (губы)

Известно несколько десятков видов формата, но так как нас интересуют полутоновые виды изображения, то вкратце остановимся на форматах JPEG, BMP, GIF, PNG, TIFF.

JPEG (Joint Photographic Experts Group) предназначен для изображений фотографического качества. Его базовая система сжатия реализуется с потерями. Является одним из наиболее популярных способов кодирования изображений, в том числе и по причине небольшого объема. Имеет ряд модификаций, например, стандарт сжатия больших полутоновых изображений без потерь (или с ограниченными, задаваемыми пользователем потерями).

BMP (Windows Bitmap) используется в основном для простых несжатых изображений.

GIF (Graphic Interchange Format) предназначен для кодирования без потерь.

PNG (Portable Network Graphics) сжимает без потерь изображения в натуральных цветах.

TIFF (Tagged Image File Format) представляет собой гибкий файловый формат, поддерживающий множество разных стандартов сжатия.

Наряду с растровой графикой существует и векторная. Векторная графика – это способ представления изображений при помощи множества точек, которые объединяет математическая модель. Фактически каждое изображение является графиком математической функции, что позволяет ему сохранять качество отображения при изменении масштаба. В отличие от растрового рисунка, который представляет набор пикселей разных цветов, векторное изображение – это набор примитивов (линий, кривых, квадратов, кругов), описанных математическими формулами. Рисунок формируется в виде файла, который содержит данные о координатах точек и о линии, пересекающей опорные точки. Кроме того, файл включает информацию о примененных эффектах.

ГЛАВА 6

ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Avizo. Программа предназначена для работы с изображениями микроструктур, определения их дефектов, а также основных морфологических параметров: импорт данных, визуализация, сегментация, анализ, анимация (базовый набор функций), расширенная сегментация и ее количественная оценка, сегментация и анализ волокон, характеристика и моделирование сети пор, моделирование свойств материалов, цифровая корреляция для измерения деформации материала, локализация и визуализация больших многоканальных и временных рядов данных.

В качестве примера рассмотрим результат деконволюции в программе Avizo (рис. 17).

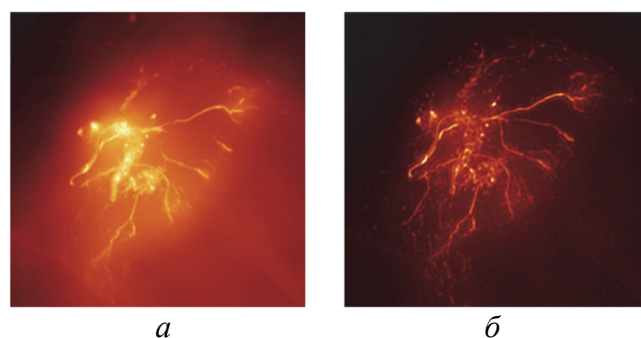


Рис. 17. Проекция максимальной интенсивности до (а) и после (б) восстановления четкости изображения, которые могут быть потеряны из-за искажений, возникающих при прохождении света через оптические элементы микроскопа (деконволюция)

На рис. 18 представлено удаление отверстия размером менее 200 пикселей.



Рис. 18. Удаление отверстия заданного размера в Avizo

Системы анализа изображений серии Image Experttm. Целью программы является определение качественных и количественных характеристик. В программе имеется возможность записи методик, представление и хранение результатов осуществляется в любой форме: таблицы, гистограммы, изображение и т. д. Кроме того, Image Experttm позволяет работать с камерой удаленно и настраивать оптическую систему комплекса.

Наиболее интересным вариантом является трехмерная визуализация с использованием технологии OpenGL, с помощью которой получается реалистичное изображение цветового профиля при плавном его вращении в заданных направлениях, а полупрозрачная секущая плоскость (уровень «моря») дает наглядное представление об уровнях для преобразований и улучшает визуальное восприятие. На рис. 19 показана визуализация 3D-профиля, полученного послойной микроскопией.

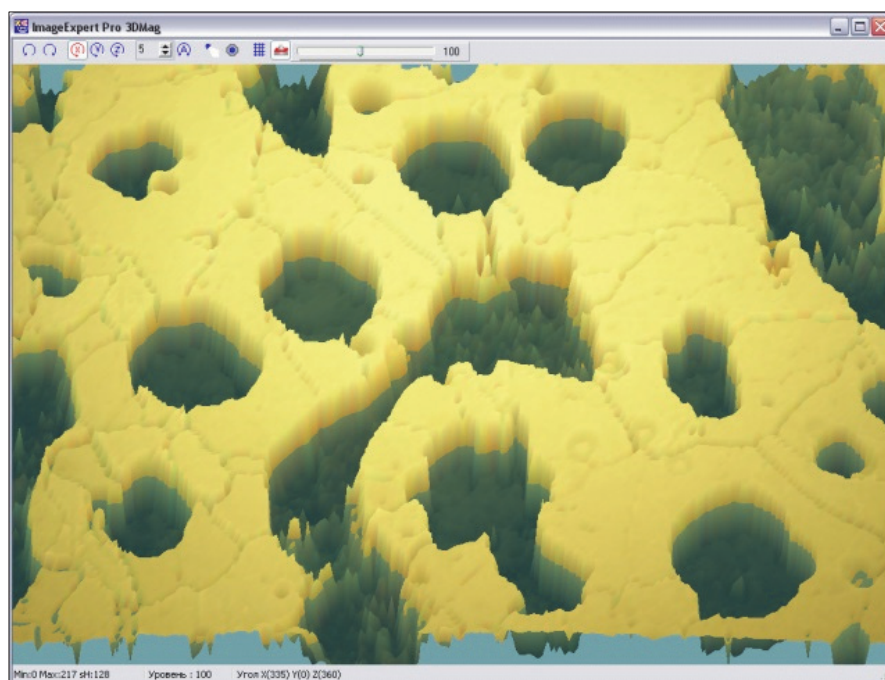


Рис. 19. Визуализация 3D-профиля

Анализатор Image Experttm Gauge предназначен для получения изображений анализируемых структур и материалов, наблюдаемых в микроскоп, с проведением простых геометрических измерений элементов структуры в реальных физических единицах. Встроенный в программу мастер съемки работает с широким спектром аналоговых и цифровых видеокамер. При работе с камерами высокого

разрешения реализована возможность ступенчатого масштабирования для режима отображения видео и для сохраняемых изображений. Анализатор изображений поддерживает наиболее популярные графические растровые форматы.

Программа Image Experttm Sample 2 – это программное обеспечение для качественного анализа изображений, полностью или частично ориентированное на анализ структур посредством сравнения с эталонами.

Видеотест. Программа имеет аналогичные возможности, а именно: позволяет распределять объекты по их яркости, а также определять геометрические формы в трехмерном пространстве благодаря интеграции в программу успешных оптических методов. Пример использования программы для проведения бинаризации с произвольным порогом приведен на рис. 20.

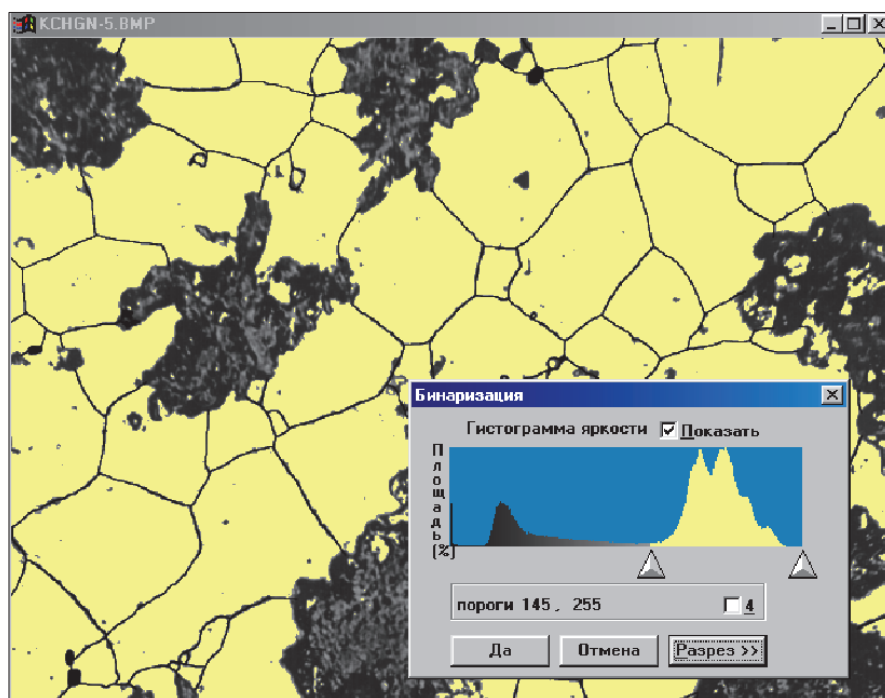


Рис. 20. Результат бинаризации изображения в программе Видеотест

MetaXpress®. Программное обеспечение MetaXpress® – это платформа для получения и анализа 2D- и 3D-изображений. Модуль анализа 3D-изображений может анализировать сфероиды, микроткани, клетки в 3D-матрице и небольшие организмы. Модульная панель инструментов позволяет быстро настраивать сотни обычно используемых высококонтентных анализов. Продукт дает возможность

выполнять расширенные анализы, такие как идентификация объектов внутри объектов и создание морфометрических классификаторов для анализа формы. На рис. 21 приведены результаты использования адаптивной коррекции фона.

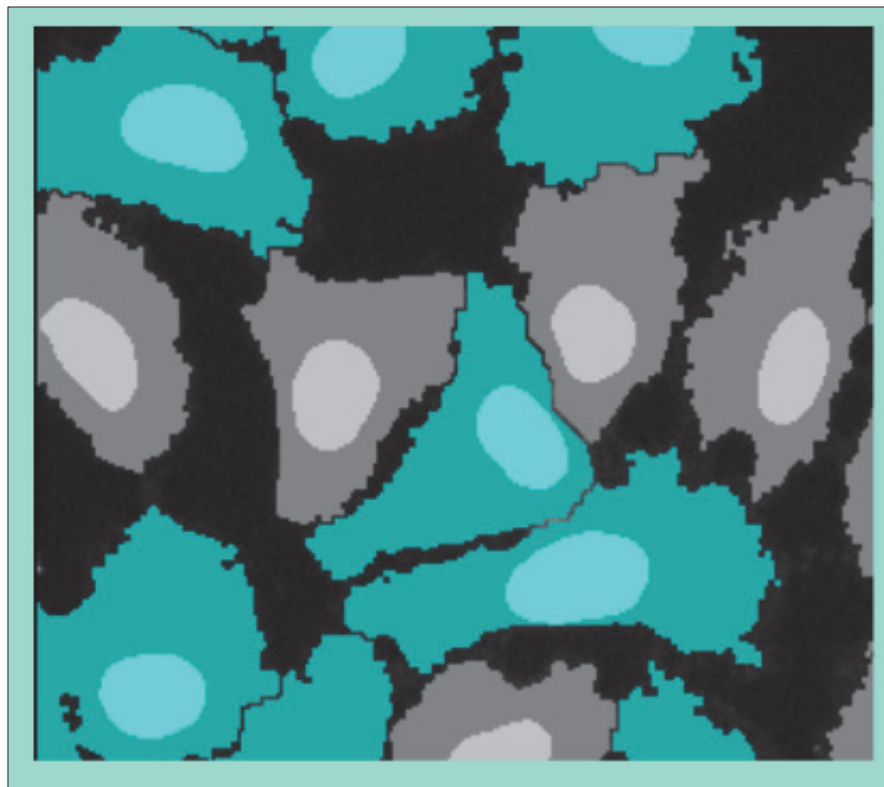


Рис. 21. Результаты сегментации изображения в MetaXpress®

ImageJ. Программа для обработки и анализа изображений с открытым исходным кодом, написанная National Institutes of Health на языке Java, что позволяет автоматизировать сложные повторяющиеся действия. Открытый код дает возможность добавлять дополнительные модули (плагины) людям, не являющимся разработчиками. Плагины позволяют расширить функционал программы и проводить визуализацию вплоть до рентгенологических изображений.

Endrov. Программа с открытым исходным кодом для обработки и анализа изображений основана на языке Java и большей части философии ImageJ, но старается заменить ее при помощи современного дизайна. Программа построена так, чтобы разграничивать код графического интерфейса от других данных, модулей и фильтров, а также их между собой. Упор делается на то, чтобы

уменьшить избыточность кода и упростить обслуживание. Данную программу можно считать приемником, учеником ImageJ. Продукт совмещает в себе и библиотеку данных, и программу для визуализации, при этом разделяя все между собой и нарушая обратную совместимость ради дизайна, считая, что большое количество плагинов без нарушения совместимости приводит к ошибкам в дизайне. Из особенностей можно выделить обработку дополнительных измерений, что важно для серьезной микроскопии, еще у программы есть собственный формат изображений, что не мешает ей поддерживать и другие наиболее распространенные форматы.

На рис. 22 приведен пример окна Endrov.

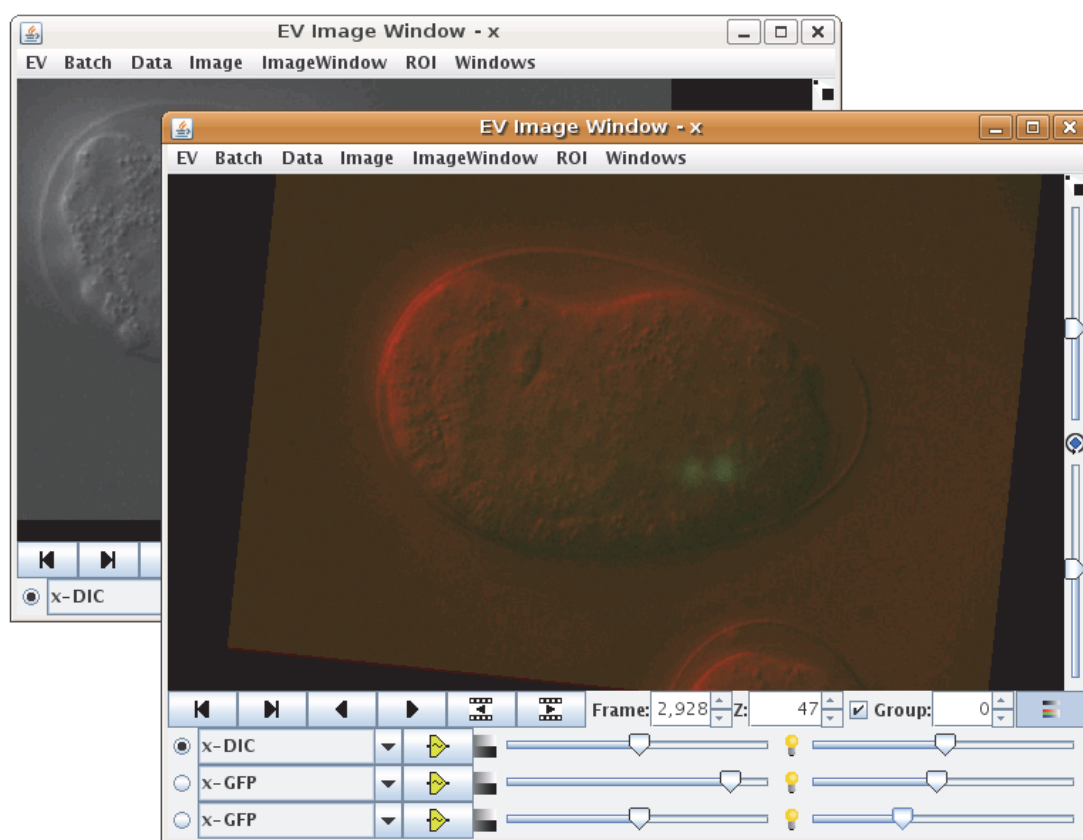


Рис. 22. Пример окна Endrov

MIPAR. Это современная высокоэффективная программная система для обработки и анализа изображений, которая способна идентифицировать и оценивать характеристики объектов практически на любых изображениях. Широкое разнообразие областей использования программного продукта делает систему одним из наиболее универсальных и гибких решений. Изначально система MIPAR

была разработана для решения задач анализа изображений в материаловедении, однако с тех пор проделала большой путь в своем развитии. Сегодня система используется исследовательскими лабораториями, в университетах, в небольших компаниях и крупных корпорациях, а области применения варьируются от анализа изображений атомов до обработки аэроснимков. Дополнительный модуль MIPAR содержит инструменты для работы с 3D-изображениями.

Принципы работы с MIPAR основаны на использовании специальных наборов правил (Recipes). Готовые наборы команд доступны для бесплатного скачивания с сайта, их можно применять в качестве основы для разработки собственных программ. Их разработка не требует программирования, а осуществляется через современный ленточный интерфейс системы. Каждый готовый набор команд легко модифицировать, использовать итерационно, а также распространять среди коллег.

Структура наборов команд позволяет формировать последовательности команд из алгоритмического ядра MIPAR и контролировать порядок их выполнения. Каждую встроенную процедуру можно применять с настройками по умолчанию либо, при необходимости, проводить дополнительные настройки внутренних параметров. Любую готовую программу можно использовать для потоковой обработки нескольких однотипных изображений. Результаты обработки можно дополнительно обработать в ручном режиме, а затем сгенерировать отчет с результатами анализа.

Ниже приведено несколько примеров выполнения обработки изображения на платформе MIPAR (рис. 23–27).

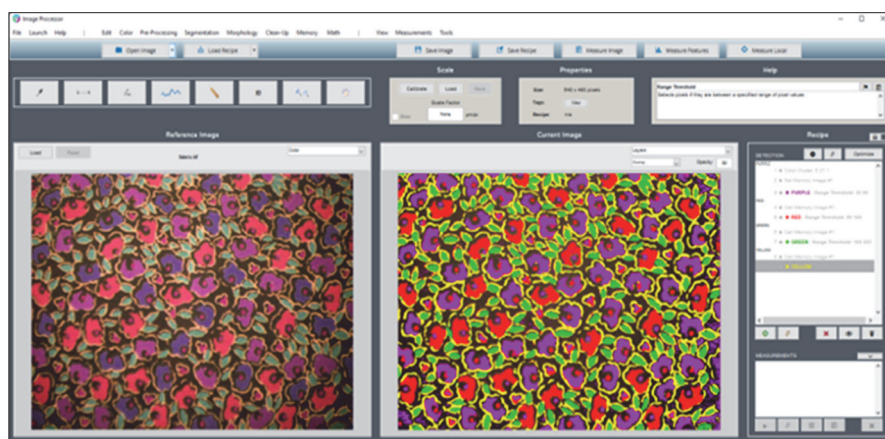


Рис. 23. Кластеризация (алгоритм k -средних) в MIPAR

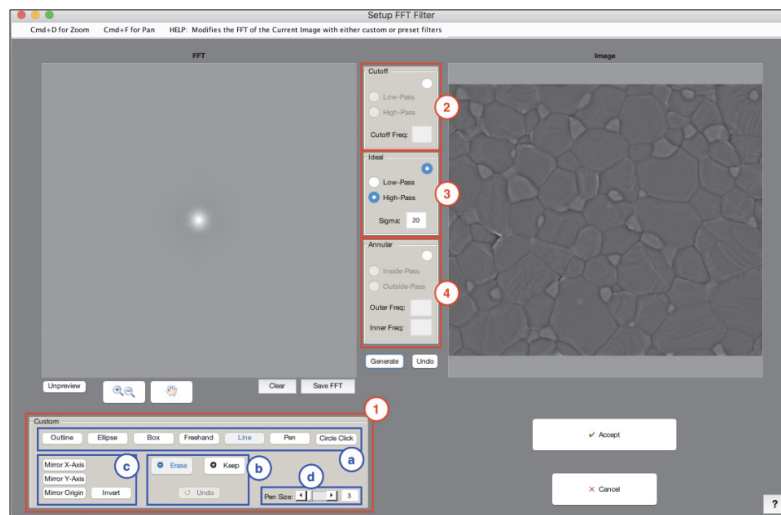


Рис. 24. Преобразование Фурье на платформе MIPAR

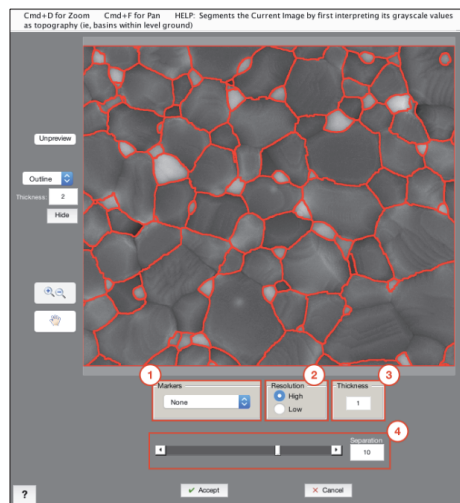


Рис. 25. Сегментация в MIPAR

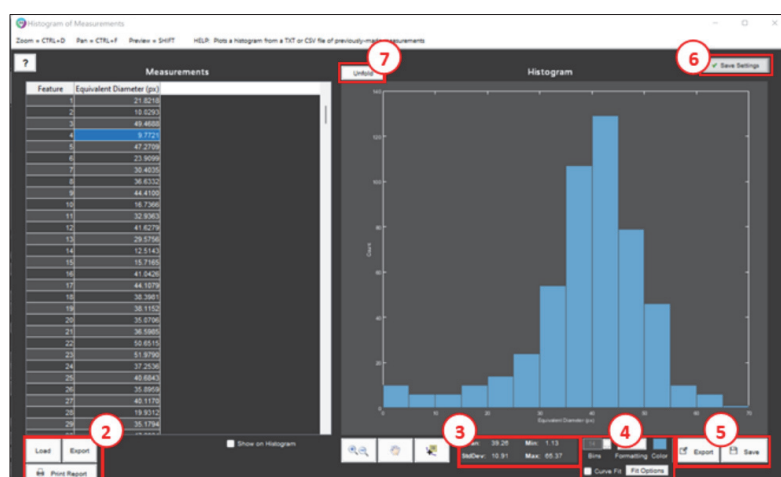


Рис. 26. Гистограмма, полученная в MIPAR

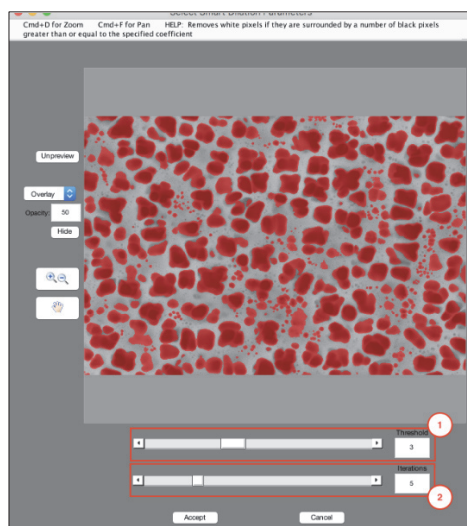


Рис. 27. Морфология в MIPAR

СМЕІАС. Программный продукт процедур обработки изображений, включающий настройку контрастности/яркости, резкость, вычитание фона, медианное сглаживание, преобразование цвета в оттенки серого, усреднение стека, растяжение гистограммы, свертку соседства и ручной редактор пикселей. Обновленная версия содержит три инструмента редактирования изображений для облегчения сегментации объектов на изображениях перед анализом с улучшенными технологиями обработки изображений. Это приложение предназначено для помощи в исследованиях, использующих цветовые классификации. Оно имеет гибкую, определяемую пользователем настройку цветового допуска для интерактивной выборки обучающего набора локальных цветных пикселей, находит границу каждой клетки и, наконец, создает новое сегментированное выходное изображение RGB, содержащее эти окрашенные передним планом микробы на фоне без шума. Его производительность была тщательно протестирована на многих сложных цветных изображениях, проанализированных попиксельно по одному за раз. В результате было установлено, что СМЕІАС работает с точностью ~99%.

Это программное приложение также включает другие процедуры обработки изображений для заполнения пустых отверстий в объектах, удаления пиксельного шума путем расширения/эрозии, разделения изображений на каналы их цветовой модели RGB/HSI/YUV, псевдоцветные характеристики объектов, отличающиеся по яркости, для помощи в определении их контура (особенно важно во флуоресцентной микроскопии) и установки пороговых значений для размера объекта и фильтрации яркости.

Продукт имеет плагин CMEIAS Object Separation для автоматического разделения соприкасающихся объектов на пороговых изображениях. Он работает с точностью 95,8% и имеет уникальный дизайн, который позволяет избежать удаления пикселей, что приводит к ошибочному уменьшению размера сегментированных объектов, в отличие от других автоматизированных инструментов разделения объектов (например, watershed), представленных в другом программном обеспечении для обработки изображений.

Ниже показан результат обработки изображений для выделения объектов переднего плана по цветовой сегментации (рис. 28 и 29).

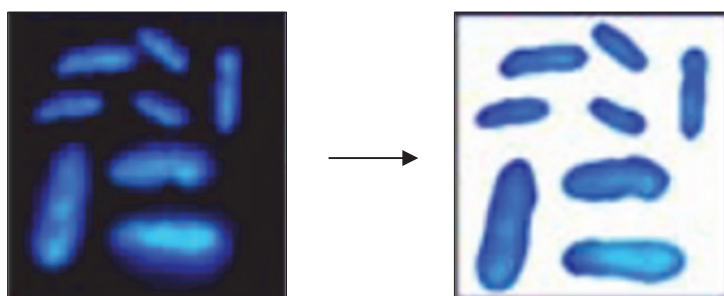


Рис. 28. Обработка в CMEIAS пикселей переднего плана и фона, которые схожи по оттенку цвета, но различаются по яркости

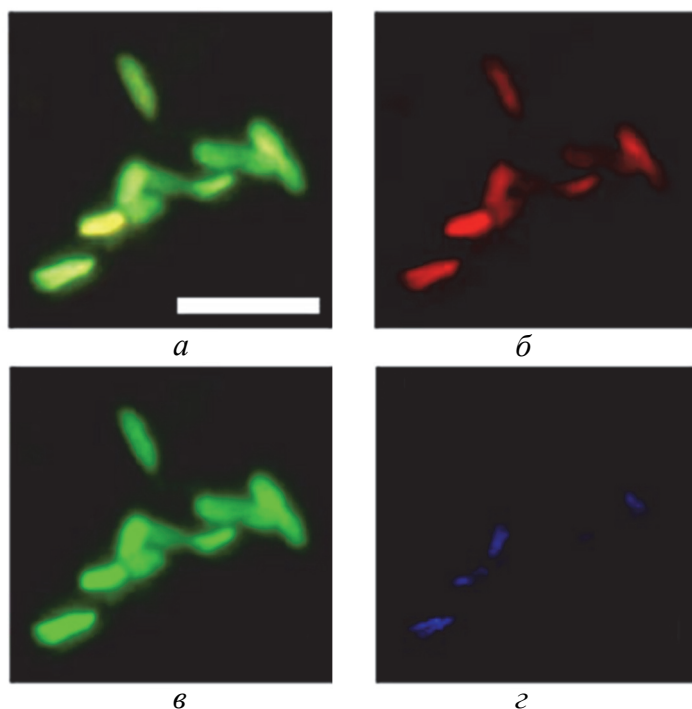


Рис. 29. Цифровые изображения:

a – исходное изображение;
б–г – то же изображение, разделенное соответственно на красный, зеленый и синий хроматические каналы

Отдельно остановимся на так называемых инструментальных платформах, сочетающих оптический микроскоп и программный комплекс по обработке данных.

SIAMS Photolab. Данная инструментальная платформа на базе электронных таблиц SIMAGIS обеспечивает автоматическое получение результата количественного металлографического анализа от ввода изображения с микроскопа до формирования отчета. В комплект базовых инструментов для автоматизации работы с изображениями входят: «Градуировка системы», «Рабочая таблица» – инструмент, позволяющий захватывать изображения с видеокамеры или сканера, импортировать изображения из файла, сохранять, экспортировать, обрабатывать изображения, используя встроенные функции и создавать отчеты, «Измерение объектов», «Измерение углов и длин», «Реконструкция сфокусированного изображения», «Сшивка изображений», «Примеры решений».

В программе встроены функции для улучшения качества изображения (яркость/контраст, баланс цвета, выравнивание освещенности, повышение резкости, расширение фокуса, сшивка смежных полей зрения, вычитание помех, дефектов пробоподготовки, поворот, отражение, обрезка по рамке и др.), а также для измерения параметров структуры (длин, диаметров, площадей, углов, расстояний между кривыми).

Optika Vision Pro. Это профессиональное программное обеспечение для анализа изображений к аналогичному микроскопу. Сегмент PROView включает в себя все функции пакета LITEView – базовые функции обработки изображений и коррекции фона, но в дополнение позволяет реализовать следующие опции: баланс белого и черного, полностью настраиваемый графический интерфейс, визуализация многоканальных флуоресцентных изображений с функцией «сдвига пикселей».

В качестве иллюстрации работы приведем пример (рис. 30), как Optika Vision Pro строит гистограммы для всех трех каналов активного изображения на основе цветовой модели RGB. В черном квадратном поле ось x представляет значение цвета от самого темного (0) в крайнем левом углу до самого яркого (255) в крайнем правом; ось y представляет частоту, т. е. общее количество пикселей с этим значением; начало гистограммы – нижний левый угол черного поля. Гистограммы красного, зеленого и синего каналов показаны в той же системе координат, что и красные, зеленые и синие полосы, и поэтому они могут перекрываться.

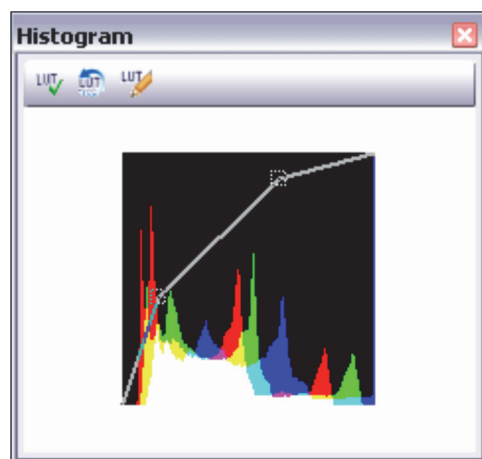


Рис. 30. Гистограмма, полученная в Optika Vision Pro

Данный продукт имеет интересную функцию, на которую редко обращают внимание, смирясь с проблемой битых пикселей в камере. Используя команду Remove Bad Pixels для обнаружения и исправления неисправных пикселей, можно проиллюстрировать процесс (рис. 31).

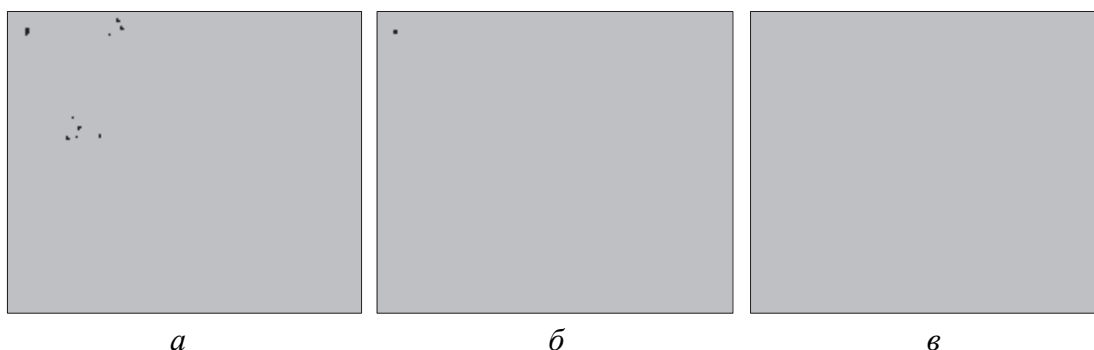


Рис. 31. Удаление битых пикселей на фоновом изображении:
а – изображение, полученное камерой с дефектными пикселями;
б – результат применения команды;
в – результат выполнения команды дважды

JMicroVision. JMicroVision – это современное программное обеспечение, разработанное для визуализации и анализа данных, которое находит широкое применение в научных, медицинских и технических областях. Программа создана с акцентом на удобство использования и мощные аналитические функции, что делает ее идеальным инструментом для исследователей и специалистов. С момента своего выхода на рынок JMicroVision зарекомендовала себя как надежный

инструмент, способствующий более глубокому пониманию исследуемых объектов и процессов.

Процесс визуализации данных играет важную роль в анализе результатов экспериментов и наблюдений, позволяя выявлять закономерности и аномалии, которые могут быть невидимыми при анализе «сырых» данных. JMicroVision предлагает пользователям широкий спектр инструментов для обработки изображений, анализа сигналов и визуализации многомерных данных.

Основные функции. Одной из ключевых особенностей JMicroVision является ее многофункциональность. Рассмотрим подробнее основные функции программы.

1. Инструменты для визуализации данных:

- JMicroVision поддерживает создание различных типов графиков, включая линейные, гистограммы, 3D-графики и тепловые карты. Пользователи могут настраивать различные параметры визуализации, такие как цветовая схема, размер точек и масштаб, что помогает лучше представить данные;

- программа также позволяет накладывать несколько наборов данных на один график, что упрощает сравнение и анализ взаимосвязей между различными переменными;

- имеется возможность экспорта графиков в форматы изображений (JPEG, PNG, TIFF) или в векторные форматы (SVG, PDF) для дальнейшей обработки в графических редакторах или представления в публикациях.

2. Анализ и обработка сигналов:

- инструменты для временного анализа сигналов позволяют пользователям выявлять регулярности и паттерны в данных за счет применения алгоритмов фильтрации, сглаживания и спектрального анализа;

- поддержка Фурье-преобразования дает возможность выполнять частотный анализ сигналов, что полезно в приложениях, связанных с акустикой, оптикой и электротехникой;

- программа также включает функции по анализу рандомизированных сигналов, что позволяет исследователям работать с данными, которые могут быть подвержены шумам или осцилляциям.

3. Поддержка различных форматов данных:

- JMicroVision совместима с множеством форматов данных, включая CSV, TXT, HDF5 и др. Это позволяет пользователям легко импортировать данные из различных источников, в том числе результаты экспериментов, архивы данных и базы данных;

– функции пакетной обработки дают возможность пользователям загружать и обрабатывать большие объемы данных одновременно, что существенно экономит время при выполнении рутинных задач.

4. Настройки и параметры пользователя:

– JMicroVision предлагает гибкие настройки интерфейса, что позволяет пользователям адаптировать рабочее пространство под свои предпочтения. Это включает настройку расположения панелей, выбор инструментов, которые часто используются, и кастомизацию хоткеев;

– в программе также есть возможности для сохранения пользовательских макетов, что позволяет пользователям быстро переключаться между различными конфигурациями рабочего пространства в зависимости от задач.

Интерфейс пользователя. Для успешной работы с любым программным обеспечением важным аспектом является его интерфейс. В JMicroVision интерфейс разработан с акцентом на удобство и интуитивность.

Главное меню и панели инструментов. Основное меню включает разделы для загрузки данных, выполнения анализа, настройки визуализации и сохранения результатов. Каждая функция имеет подсказки, что облегчает использование программы.

Панели инструментов являются настраиваемыми, часть пользователей может выбрать только те инструменты, которые необходимы для их работы, что упрощает навигацию.

Рабочая среда. Живые окна позволяют пользователям открывать несколько графиков и таблиц одновременно, что делает сравнительный анализ данных более доступным.

Программа предоставляет возможность перетаскивать и менять размеры различных элементов интерфейса для создания наиболее удобного рабочего пространства.

Применение в научных исследованиях. JMicroVision находит широкое применение не только в научных исследованиях, но и в промышленности.

Анализ поверхности бумаги является одним из популярных направлений использования JMicroVision. Исследование свойств бумаги имеет значение для целого ряда отраслей – от полиграфии до текстиля. С помощью JMicroVision исследователь может:

1) собирать данные: загружать микроизображения образцов бумаги, сделанные с помощью электронного или оптического микроскопа;

2) обрабатывать изображения: применять фильтры для удаления помех и шумов, что позволяет получить более четкие изображения для дальнейшего анализа;

3) измерять текстурные характеристики: программа предоставляет возможность проводить анализ текстуры, выравнивая неровности поверхности. Исследователь может измерить степень шероховатости поверхности, что является критическим фактором для оценки качества бумаг.

Например, с помощью JMicroVision можно вычислить значение среднеквадратичной шероховатости (RMS) поверхности бумаги. Это значение может помочь в оценке совместимости бумаги с различными печатными методами;

4) выполнить сравнительный анализ: пользователи могут провести сравнительный анализ нескольких образцов бумаги, визуализируя результаты на одном графике, что упрощает интерпретацию данных и позволяет делать более обоснованные выводы.

Достоинствами использования JMicroVision являются:

- удобство интерфейса: программа обладает интуитивно понятным интерфейсом, который делает ее доступной как для опытных, так и для новых пользователей;

- многофункциональность: JMicroVision предлагает множество инструментов для анализа и визуализации, что делает ее универсальным решением для различных исследований;

- широкая поддержка форматов данных: возможность работы с различными форматами данных позволяет легко интегрировать программу в существующие рабочие процессы;

- активное сообщество: JMicroVision поддерживается активными пользователями, благодаря чему пользователи могут находить советы и обмениваться опытом.

К недостаткам использования JMicroVision относятся:

1) более узкий функционал, чем у ImageJ;

2) время от времени зависание в операционной системе Windows.

Системные требования. Программу JMicroVision можно установить на любой платформе, поддерживающей Java 1.5 и JAI (Java Advanced Imaging). Кроме того, Windows, Linux, Solaris и Mac OS X (частично) имеют собственные ускорители, которые повышают производительность программы. Для работы программе необходимы минимум 256 Мбайт ОЗУ (рекомендуется 512 Мбайт для обработки больших изображений), а также 60–90 Мбайт свободного места на

диске (включая виртуальную машину Java). Для установки на Mac OS X потребуется только 3,2 Мбайт.

Помощь в Internet. Для загрузки последней версии, справки и ресурсов следует пройти по ссылке: <http://www.jmicrovision.com>. Если пользователь столкнулся с проблемой в программе, то можно сообщить об этом в систему отслеживания ошибок по адресу: <http://www.jmicrovision.com/mantis>. Техническая поддержка в JMicroVision бесплатная, поэтому официальная техническая поддержка недоступна, но пользователь может отправлять свои вопросы или проблемы по адресу: support@JMicroVision.com. Интерактивная справка осуществляется по приложению. Для этого в меню справки JMicroVision следует выбрать *Содержание* и *Индекс*. Чтобы просмотреть раздел справки, непосредственно связанный с текущим окном, необходимо нажать кнопку *Справка* в программе.

Поддерживаемые форматы файлов для загрузки изображений. В JMicroVision поддерживаются следующие форматы: BMP, FlashPIX, GIF, JPEG, PNG, PNM и TIFF.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ IMAGEJ

ImageJ – это программа для научного анализа изображений. Созданная Национальным институтом здравоохранения США, ImageJ является общественным достоянием (лицензия Public domain), может быть запущена на различных операционных системах, для которых есть виртуальная машина Java. Название ImageJ происходит от Image (изображение) и Java – язык, на котором написана программа. Скачать ImageJ можно по адресу: <http://imagej.nih.gov/ij/download.html>.

ImageJ – свободно распространяемое программное обеспечение с открытым исходным кодом. Вы можете свободно запускать программу в любых целях, изменять ее для своих задач, распространять среди любых стран и пользователей.

Для изменения количества оперативной памяти, используемой ImageJ, воспользуйтесь командой *Edit* → *Options* → *Memory & Threads*. Не рекомендуется устанавливать в поле *Maximum memory* значение, большее 75% от общей оперативной памяти компьютера.

Окна. Основное рабочее окно программы ImageJ содержит строку меню, строку инструментов, строку состояния и строку изменения (рис. 32). Изображения, гистограммы, профиль линии и другие элементы отображаются в дополнительных окнах.

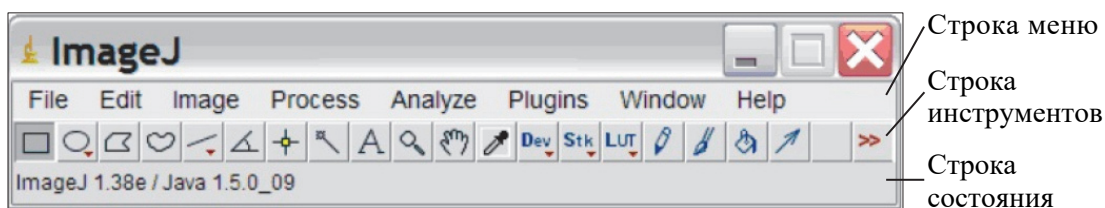


Рис. 32. Основное окно программы ImageJ

Результаты измерения отображаются в окне *Results*. Окна можно перетаскивать по экрану и изменять их размер. Гистограммы и графики обычно изображаются в окнах, с которых их можно скопировать во внутренний буфер обмена, отредактировать, напечатать или сохранить.

Строка инструментов (Toolbar). Строка инструментов содержит инструменты выбора, инструменты для изменения масштаба изображения и прокрутки изображений, инструменты для изменения цвета рисунка. Нажмите на иконку инструмента, и описание этого инструмента отобразится в строке состояния.

Строка состояния (Status Bar). Строка состояния отображает пиксельные координаты и значения на изображении в том месте, где в данное время стоит курсор. При включении фильтра отображается прошедшее время и скорость обработки в пикселях/секундах.

Строка изменений (Progress Bar). Строка изменений, расположенная справа от строки состояния, показывает изменение операций во времени. Она не будет появляться, если для совершения операции требуется менее или приблизительно 1 с.

Изображения. Программа ImageJ позволяет нескольким изображениям быть отображенными на экране одновременно. При этом активное окно подсвечивается в области заголовка. Все операции будут выполняться на активном изображении. ImageJ поддерживает 8-, 16- и 32-битные черно-белые изображения и 8- и 32-битные цветные изображения. 8-битные изображения представлены целыми числами без знака в диапазоне от 0 до 255. 16-битные изображения используют целые числа без знака в диапазоне от 0 до 65 535, а 32-битные черно-белые изображения – числа с плавающей точкой, т. е. числа в экспоненциальном виде (порядка двух миллиардов значений).

Стеки. Программа ImageJ может отобразить множество пространственно или временно связанных изображений в одном окне. Эти серии изображений носят название стеков. Изображения, которые составляют стек, называют слоями. Все слои в стеке должны быть одинакового размера и одного и того же битового разряда. Перемещаться между слоями можно с помощью линейки прокрутки. Большинство фильтров программы ImageJ при использовании обрабатывают все слои в стеке.

Выделения. Выделения – определяемые пользователем области или строки в пределах изображения. Одновременно быть активными несколько выделений не могут, поэтому если вы выделите одну часть, а затем вторую, то первое выделение пропадет и останется активным второе. Область выбора создается различными инструментами (прямоугольник, овал, многоугольник и «от руки» – область выделения вы выбираете сами с помощью мыши). Выделенные области могут быть измерены (*Analyze* → *Measure*), отфильтрованы, заполнены (*Edit* → *Fill*) или нарисованы (*Edit* → *Draw*). Выделенные строки создаются с помощью линий (они могут быть прямые, сегментированные или «от руки»).

Чтобы нарисовать цветные линии, используется команда *Edit* → *Draw*. Длина выбранной линии может быть измерена с помощью команды *Analyse* → *Measure*. Выделенные участки могут быть отмечены кликом и перемещены. Строка состояния отображает координаты в верхнем левом углу выбранного участка (или ограничительного прямоугольника для непрямоугольных участков). Обратите внимание, что курсор изменяется на стрелку, когда он находится в пределах выбранного участка. Перемещение содержания выбранного выполняется с помощью команд *Edit* → *Copy*, *Edit* → *Paste*.

Панель инструментов. Кнопки на панели инструментов позволяют измерять различные объекты, наносить метки и другие элементы на изображение и др. Клик правой клавишей мыши по некоторым кнопкам (с маленьким красным треугольником в правом нижнем углу) позволяет открыть меню с дополнительными инструментами.

Инструменты выделения областей на изображении (Area Selection Tools). Первые четыре кнопки панели инструментов позволяют выделить на изображении прямоугольную, овальную, многоугольную или произвольную область. Используя команды строки меню, выделенные области можно изменять, анализировать, копировать и др. При выделении области на изображении в строке состояния отображаются параметры данной операции, например координаты (xx, yy) области выделения на изображении.

Инструмент Линия (Line Selection Tools). Данная кнопка позволяет создать прямую, состоящую из сегментов, или произвольную линию (клик правой клавишей мыши позволяет выбрать необходимую операцию). Информация о линии при ее создании изображается в строке состояния. Двойной клик левой клавишей мыши по кнопке *Линия* на панели инструментов позволяет вызвать меню для изменения толщины линии. Измерить длину линии на изображении можно с помощью *Analyse* → *Measure* (или <Ctrl> + <M>). Чтобы сделать линию частью изображения, нарисуйте линию и используйте *Edit* → *Draw* (или <Ctrl> + <D>).

Инструмент Угол (Angle Tool). Позволяет создать на изображении две пересекающиеся линии и измеряет угол между ними.

Инструмент Точка (Point Tool). Используется для создания выборки точек, подсчета объектов или записи координат пикселей. При установленном флажке *Auto-Measure* записывает координаты (X и Y) и цифровое значение яркости в диапазоне 0–255 в данной точке. Для цветных изображений будет указано среднее значение яркости красного, зеленого и синего каналов (*Mean*).

Инструмент Волшебная палочка (Wand Tool). При клике по какой-либо точке на изображении инструмент выделяет прилегающие области, значение цвета в которых совпадает с цветом точки или незначительно отличается от цвета точки. Изменить чувствительность можно в окне *Tolerance* (двойной клик по кнопке *Волшебная палочка*). Пункт *Mode* предлагает следующие варианты:

1) *Legacy* – в этом случае *Волшебная палочка* выбирает только одну точку (пиксель), в который вы кликнули, и далее ищет пиксели с похожим цветом вокруг;

2) *4-connected* – в данном случае ImageJ учитывает, кроме пикселя, в который вы кликнули, также цвет четырех прилегающих с разных сторон пикселей и ищет пиксели с цветом, совпадающим с одним из рассматриваемых пяти пикселей;

3) *8-connected* – аналогично с *4-connected*, но *Волшебная палочка* учитывает цвет не четырех, а восьми прилегающих пикселей.

Инструмент Текст (Text Tool). Двойной клик по кнопке *Текст* откроет дополнительное окно, в котором можно установить тип, размер, написание шрифта. После щелчка по кнопке *Текст* кликните по изображению в необходимой для размещения текста точке, далее, удерживая левую клавишу мыши нажатой, создайте окно для ввода текста. Набирайте только английские буквы. Чтобы ввести греческую букву μ , нажмите кнопки $\langle \text{Alt} \rangle + \langle \text{M} \rangle$, а чтобы ввести значок ангстрема Å, нажмите $\langle \text{Alt} \rangle + \langle \text{Shift} \rangle + \langle \text{A} \rangle$. Для изменения цвета шрифта используйте инструмент *Пипетка*. Вы можете свободно перетаскивать мышью поле с введенным текстом в необходимую точку изображения. Чтобы нанести текст в поле на изображение, воспользуйтесь *Edit* \rightarrow *Draw* (или $\langle \text{Ctrl} \rangle + \langle \text{D} \rangle$).

Инструмент Лупа (Magnifying Glass). Позволяет увеличивать масштаб изображения при клике по нему левой клавишей и уменьшать масштаб при клике по изображению правой клавишей мыши.

Инструмент Перемещения (Scrolling Tool). Позволяет в случае, когда изображение превышает размер окна, в котором оно открыто, перемещать поле зрения на необходимый участок изображения. Инструмент можно активировать при выполнении любой операции, зажав клавишу пробел.

Инструмент Пипетка (Color Picker). Позволяет установить основной цвет (Foreground color), в котором ImageJ будет наносить текст и другие элементы на изображении. Цвет можно выбрать либо при активированном инструменте *Пипетка*, кликнув на изображении по точке с интересующим цветом, в этом случае основным цветом

будет цвет точки, либо после двойного клика по кнопке *Пипетка* (или *Image* → *Color* → *Color Picker*) выбрать цвет из открывшейся палитры. Чтобы сменить цвет фона (Background color) на цвет точки изображения, при активном инструменте *Пипетка* кликните по необходимой точке на изображении с зажатой клавишей <Alt>.

Команды меню Help. Меню содержит в основном команды открытия некоторых страниц на официальном сайте программы ImageJ, команды настройки браузеров и некоторые другие команды:

- *ImageJ Website*. Открывает главную страницу ImageJ в том браузере, который установлен у вас по умолчанию;

- *ImageJ News*. Открывает страницу News официального сайта ImageJ;

- *Documentation*. Открывает страницу Documentation на сайте ImageJ;

- *Installation*. Открывает страницу с инструкциями по установке на сайте ImageJ;

- *Search Website*. Открывает страницу поиска на сайте ImageJ. С помощью этой страницы можно производить поиск плагинов, макросов или сообщений, которые были опубликованы в списке рассылки ImageJ;

- *List Archives*. Открывает страницу с архивами рассылки. На этой странице можно осуществлять поиск в архивах списка рассылки, отправлять сообщения в список, присоединиться или покинуть список;

- *Dev Resources*. Открывает страницу с материалами для разработчиков на сайте ImageJ. На ней можно найти примеры и исходный код макросов или плагинов, готовые скрипты, описания работы макроязыка;

- *Plugins*. Открывает страницу плагинов на сайте ImageJ, где можно найти более 300 готовых плагинов, которые отсортированы по функциям;

- *Macros*. Открывает страницу макросов на сайте ImageJ, где можно найти более 200 готовых макросов;

- *Macro Functions*. Открывает страницу руководства по макроязыку на сайте ImageJ;

- *Update ImageJ*. Обновляет ядро ImageJ (ij.jar). При запуске данной команды программа ImageJ предложит обновить ядро программы до последней версии путем скачивания обновленных файлов с сайта ImageJ и замены ими старых файлов на компьютере. Обратите внимание, что если программа установлена в каталог Program Files, то учетная запись должна иметь права администратора, иначе файлы не смогут быть установлены в каталог программы;

– *Update Menus*. Обновляет меню ImageJ после добавления (или удаления) плагинов и макросов в папку плагинов. После выполнения этой команды в меню *Plugins* все плагины и макросы будут стандартные, т. е. устанавливаемые автоматически при первой установке программы;

– подменю *About Plugins*. Отображает информацию о некоторых плагинах, содержащихся в папке *Plugins*;

– *About ImageJ*. Открывает изображение, содержащее информацию о версии ImageJ и авторе, адрес сайта, Java-версию и количество доступной памяти. С помощью команды *Plugins* → *Utilities* → *ImageJ Properties* можно получить дополнительную информацию;

– команды меню *Window*. Это меню состоит из четырех команд и списка открытых в ImageJ изображений. В списке всех изображений рядом с именем активного изображения стоит галочка;

– *Show All*. Делает видимыми все окна, открытые ImageJ (не только изображения, стеки, но и окна результатов, диалоговые окна различных настроек и т. д.);

– *Put Behind (Tab)*. Показывает следующее открытое изображение. Горячая клавиша данной команды <Tab>;

– *Cascade*. Перемещает все открытые изображения в левую часть экрана и размещает их каскадами;

– *Tile*. Уменьшает все изображения таким образом, чтобы они вошли на экран.

Команды File. В *File* имеется вкладка *New*, которая содержит команды, позволяющие создавать новые окна.

New → *Image* (<N> или <Ctrl> + <N>) открывает окно с новым изображением. При ее запуске появляется диалоговое окно, в котором можно задать необходимые параметры нового изображения (заголовок изображения, тип, размеры и начальное содержимое).

В диалоговом окне *New Image* в поле *Name* следует ввести название будущего изображения, в поле *Type* необходимо выбрать его тип (это могут быть 8-, 16- (беззнаковое), 32-битные полутоновые (с плавающей точкой) изображения или цветные RGB-изображения). Поле *Fill With* (*Заполнить*) позволяет задать фон изображения – белый (white), черный (black) или переход от черного к белому справа налево (ramp). В полях *Width* и *Height* задается ширина и высота изображения в пикселях. Наконец, поле *Slices* (*Слои*) указывает, сколько слоев будет в изображении. Если установить в поле *Slices* значение больше единицы, то получится стек, с которым

программа ImageJ эффективно работает. При этом в окне нового изображения появится полоса прокрутки, которая будет служить для навигации между слоями стека.

New → *HyperStack* создает новый гиперстек. При запуске команды появляется диалоговое окно, в котором задаются необходимые параметры гиперстека. Часть из них рассмотрена ранее.

Поскольку гиперстеки являются многомерными изображениями, их параметры расширяются до четырех (4D) или пяти (5D) измерений: *x* (ширина), *y* (высота), *z* (слои), *c* (цветовые каналы или длины волн) и *t* (временные кадры). Гиперстеки отображаются в окнах, содержащих три скроллера. Скроллер с названием *c* позволяет выбирать канал изображения, скроллер *z* – слой. Скроллер, обеспечивающий навигацию по кадрам (*t*), по аналогии с проигрывателем совмещен с кнопкой воспроизведения ►. При нажатии на нее можно просматривать изменение гиперстека во времени. Если при создании гиперстека установлен флажок *Label Images*, то на создаваемых изображениях гиперстека будет отображена информация о том, какой слой, канал или кадр перед вами. Пример гиперстека можно посмотреть, выбрав в меню *File* → *Open Samples* → *Mitosis* (26MB, 5D stack).

New → *Text Window* (<Shift> + <N>) создает новое текстовое окно с названием «Untitled.txt».

Текстовое окно представляет собой подобие блокнота, в котором можно набирать тексты, но самое главное, в нем можно писать и отлаживать макросы.

New → *Internal Clipboard* (<Shift> + <V>) открывает содержимое так называемого внутреннего буфера обмена, т. е. буфера программы ImageJ. Например, если вы скопировали часть любого открытого изображения, то при выполнении команды создастся новое изображение на основе скопированной части.

New → *System Clipboard* (<Ctrl> + <Shift> + <V>). Программа ImageJ использует два буфера обмена: внутренний буфер программы и буфер обмена операционной системы.

Команда *New* → *System Clipboard* открывает содержимое системного буфера как новое изображение. Для этого необходимо, чтобы в буфере находилось изображение либо его фрагмент.

Команды *File* → *Open*, *Open Next*, *Open Recent*. *Open* – команда открытия файла (<O> или <Ctrl> + <O>). При вызове этого пункта меню открывается диалоговое окно, в котором нужно указать путь к файлу. Поддерживаются следующие форматы файлов: TIFF, GIF, JPEG, DICOM, BMP, PGM или FITS.

Изображения в формате TIFF могут быть 1-, 8-, 16- (беззнаковыми), 32-битными (действительными) или RGB цветными.

TIFF-файлы, содержащие множество изображений одинакового типа и размера, будут открываться в программе ImageJ как стек. Если установить опцию *Debugging* (Отладка) из меню *Edit* → *Options* → *Misc*, то ImageJ будет отображать теги файла TIFF при открытии такого файла.

Поддержка технологии Drag and Drop для Windows позволяет пользователю открывать изображения, текстовые файлы, ROI (области интересов) и LUT (Lookup table/Таблица поиска – «палитра» изучаемого изображения) путем перетаскивания их прямо в окно ImageJ. Это существенно облегчает работу с программой ImageJ и избавляет от рутинного открытия файлов через *File* → *Open*.

Open Next (<Ctrl> + <Shift> + <O>) открывает следующее изображение из той папки, в которой было открыто активное изображение. Это бывает полезно, когда нужно последовательно работать с серией изображений, которые пронумерованы и лежат в одной папке. Открывает примеры изображений, загружая их непосредственно с официального сайта ImageJ. Для этого, конечно, компьютер должен быть подключен к сети Internet. Предлагаемые примеры хорошо подходят для тестирования плагинов и макросов и представляют собой различные типы изображений.

Open Recent позволяет открыть одно из 15 последних недавно открытых изображений.

Команды File → Import. *Import* показывает установленные плагины для захвата изображений.

Image Sequence открывает серию изображений в указанной папке как стек. Все изображения должны быть одинакового размера и типа. Они могут быть в формате TIFF, JPEG, DICOM, BMP, GIF. Во время выполнения этой команды последовательно открываются два диалоговых окна. Первое окно служит для выбора папки. Здесь, чтобы открыть серию изображений, следует зайти в папку, в которой находятся необходимые изображения, выбрать одно из них и нажать кнопку *Open* (Открыть). После этого откроется второе диалоговое окно, в котором можно настроить параметры открываемого стека.

Поле *Number of Images* (Число изображений) предназначено для указания количества открываемых изображений. *Starting Image* устанавливает начальное изображение *n* в папке, с которого начнет открываться стек. Если изменить поле *Increment* (Прибавление)

до значения «2», то программа будет открывать изображения из папки через одно, т. е. каждое второе, значение «3» позволит открывать каждое третье изображение в папке и т. п.

Если в поле *File Name Contains (Имя файла содержит)* ввести строку, например ImageJ, то в стеке окажутся только те файлы, имена которых содержат эту строку.

Если в поле *Scale Image (Масштабировать изображение)* уменьшить значение, то это уменьшит и количество требуемой для работы памяти. Например, введение значения «50» в это поле уменьшает объем памяти, необходимый для открытия стека, на 75%.

Если поставить флажок в поле *Convert to RGB (Конвертировать в RGB)*, то это позволит совместить в открываемом файле как RGB, так и полутоновые изображения.

При установке флажка *Sort Names Numerically (Сортировать имена по номерам)* открываемые в стеке файлы будут упорядочены по номерам в именах файлов (например, name1.tif, name2.tif, name10.tif) вместо использования алфавитно-цифровой сортировки (например, name1.tif, name10.tif, name2.tif). Файлы формата DICOM серии (tag# 0020,0011) всегда сортируются по тегу номера изображения (0020,0011).

Отметка *Use Virtual Stack (Использовать виртуальный стек)* используется для открытия изображений как виртуального стека, предназначенного только для просмотра. При создании такого стека он не будет записан на диск. Для примера использования виртуального стека нужно обратиться к макросу *Process Virtual Stack*, который располагается в папке с примерами.

Другой способ открытия последовательности изображений – использование макроса *OpenSeriesUsingFilter*, который открывает серию изображений в стек с помощью настраиваемых фильтров имен файлов.

RAW импортирует изображения в формате RAW. Этот формат не имеет четкой спецификации и представляет информацию об изображении в исходном, необработанном виде. Данная команда используется для импорта изображений, формат файлов которых непосредственно не поддерживается ImageJ. При этом необходимо знать некоторую информацию о расположении файла с изображением, о размере изображения, а также о смещении начала изображения в файле, т. е. место, откуда начинаются данные в файле изображения.

При выборе этой команды сначала откроется диалоговое окно, для того чтобы выбрать нужный для импорта файл, после чего откроется второе диалоговое окно с параметрами импорта файла.

С помощью выпадающего меню в верхней части диалогового окна нужно выбрать тип изображения:

- 1) 8-битное беззнаковое целое;
- 2) 16-битное целое число;
- 3) 16-битное беззнаковое целое;
- 4) 32-битное целое число;
- 5) 32-битное с плавающей точкой;
- 6) 24-битное цветное RGB (перемежающееся);
- 7) 24-битное цветное RGB (плоское);
- 8) 32-битное цветное ARGB;
- 9) 1-битная карта Bitmap, конвертированная в 8-битное изображение.

Перемежающиеся (interleaved) RGB-изображения – это изображения, каждый пиксель в которых сохранен вслед за предыдущим в формате RGB. Плоские (planar) RGB-изображения содержат красный, зеленый и синий компоненты изображений, которые сохраняются в отдельных 8-битных «плоскостях». ImageJ сохраняет RGB-изображения (как TIFF, так и RAW) в формате interleaved.

Image Width (Ширина изображения) – это количество пикселей в каждой строке данных изображения и *Image Height (Высота изображения)* – количество строк в изображении. *Offset to First Image (Смещение до первого изображения)* – это количество байтов в файле до первого байта, принадлежащего собственно изображению.

Number of Images (Количество изображений) определяет количество изображений, хранящихся в файле. Если установить это значение больше, чем фактическое число изображений, содержащихся в файле, то в результате получится стек, сокращенный до фактического размера.

Gap Between Images (Интервал между изображениями) – количество байтов от конца одного изображения до начала следующего.

Отметьте *White is Zero (Белый равен нулю)*, если черные пиксели представлены значениями, которые меньше, чем значения яркости, используемые для белых пикселей. Если изображения выглядят как фотонегативы, то изменение этого флажка должно решить проблему.

Little-Endian Byte Order (Порядок байтов от младшего к старшему) должен быть отмечен при импортировании 16- и 32-битных полутоновых изображений из машин с прямым порядком байтов, таких как компьютер на базе Intel.

Отметьте *Open All Files in Folder (Открыть все файлы в папке)*, и ImageJ будет импортировать все изображения в папке в виде стека. Все изображения при этом должны быть одного размера и типа.

Установите флажок *Use Virtual Stack* (*Использовать виртуальный стек*), чтобы открыть 3D-изображения как виртуальный стек (только для чтения), что значительно сокращает необходимый объем памяти.

Text Image (*Текстовые изображения*) открывает текстовый файл с разделителями-табуляторами как 32-битное изображение. Ширина и высота изображения определяется с помощью сканирования файла и подсчета числа слов и строк. Для текстовых файлов с целыми значениями, не превышающими 255, можно использовать *Image* → *Type* → → *8-bit* для преобразования в 8-битное изображение. Перед преобразованием отключите *Scale When Converting* (*Масштабировать при преобразовании*) в меню *Edit* → *Options* → *Conversions* для предотвращения масштабирования изображения от 0 до 255. Для примера используйте макрос *OpenTextImagesAsStack*, который открывает последовательность текста изображения в виде стека.

Text File открывает текстовый файл. Также текстовые файлы могут быть открыты с помощью *File* → *Open* или обычным перетаскиванием файла прямо в рабочую область программы ImageJ. При этом в программе ImageJ откроется окно редактирования текста. Текстовый редактор программы предназначен для редактирования и отладки скриптов и плагинов. Для этого в меню окна редактирования есть пункт *Debug*.

Results импортирует таблицу Results с результатами ImageJ либо текстовый файл, содержащий таблицу с разделителями-запятymi.

Stack From List открывает стек или виртуальный стек при помощи текстового файла, в котором содержится список путей файлов изображений. Сами файлы могут находиться в разных папках (в текстовом файле прописаны только пути), но все они должны быть одного размера и типа. Макрос *Virtual Stack From List* (файл *VirtualStackFromList.txt*) демонстрирует, как формировать список изображений и затем использовать его для открытия файлов изображений как виртуального стека.

TIFF Virtual Stack импортирует файл TIFF как виртуальный стек.

Команды меню File → **Close, Close All, Save, Save As.** *Close* (<Ctrl> + <W>) закрывает активное изображение. Если пользователь производил с изображением какие-либо действия и не сохранил их, то при выполнении данной команды будет предложено сохранить изменения.

Close All закрывает все открытые окна. При выполнении данной команды будет предложено сохранить изменения или полученные результаты.

Save сохраняет активное изображение или стек в TIFF-формате. Для сохранения выделенной области служит дополнительная команда *Image* → *Duplicate*.

Save As используется для того, чтобы сохранить активное окно в необходимый формат изображений, справочную таблицу, результат измерения или координаты.

TIFF сохраняет активное изображение или стек в TIFF-формате. Этот формат (кроме RAW) поддерживает все типы данных ImageJ (8, 16, 32 бит с плавающей точкой и RGB).

GIF сохраняет активное изображение в формате GIF. RGB-изображения перед сохранением должны быть преобразованы в 8-битные изображения при помощи команды *Image* → *Type* → *8-bit Color*. В противном случае сохранение невозможно и будет появляться ошибка с предложением конвертировать в *8-bit Color*.

Стеки при помощи этой команды преобразуются в анимированные GIF. Для того чтобы установить скорость кадров, нужно использовать *Image* → *Stacks* → *Tools* → *Animation Options*.

JPEG сохраняет активное изображение в формате JPEG. Можно установить качество JPEG (JPEG Quality) в меню *Edit* → *Options* → *Input/Output* для определения уровня компрессии JPEG (0–100). Меньшее значение этого показателя создает меньшие по размеру файлы, при этом файлы имеют низкое качество. Большие значения создают большие по размеру файлы с более высоким качеством.

По умолчанию разрешение, записываемое в заголовке файла JPEG, установлено в размере 72 dpi. При сохранении в формате JPEG изображение может сохраняться с потерями качества и образованием незначительных артефактов. Не рекомендуется использовать сохранение в формате JPEG, если планируется в дальнейшем проводить измерения на этом изображении или работать с ним.

ZIP сохраняет активное изображение или стек в файл TIFF-формата и упаковывает его в архив ZIP.

Raw Data сохраняет активное изображение или стек как построчные данные о пикселях без раздела заголовка.

Text Image сохраняет активное изображение как текстовый файл, содержащий таблицу с числовыми данными, разделенными табуляциями.

Image Sequence сохраняет все слои открытого стека как отдельные файлы в формате TIFF, GIF, JPEG или RAW.

AVI сохраняет активный стек в видеофайл формата AVI, используя частоту кадров, которая задается в диалоговом окне *Image* → *Stacks* → *Tools* → *Animation Options*.

PNG сохраняет активное изображение в PNG-формате (Portable Network Graphics). Все типы изображений, кроме RGB, хранятся в виде 8-битных PNG. Для таких 8-битных изображений может быть задан прозрачный цвет в диапазоне от 0 до 255, значение которого устанавливается при помощи команд *Edit* → *Options* → *Input/Output*.

LUT сохраняет таблицу преобразования (LUT) активного изображения в файл. Размер такого файла 768 байт, из которых 256 байт красных, 256 байт зеленых и 256 байт синих градаций яркости.

Measurements. Таблица активного окна *Results* сохраняется в текстовый файл с числовыми значениями, разделенными табуляцией.

Selection сохраняет выделенную область на изображении в файл. Для восстановления выделения нужно открыть файл с сохраненным выделением с помощью команды *File* → *Open*.

XY Coordinates сохраняет *XY* координаты линии выделения или границы области выделения в текстовый файл, содержащий две колонки с координатами точек, разделенных табуляцией. Координаты прямоугольного, овального выделения и выделения прямой линии не могут быть сохранены в такой файл.

Команды File → Revert, Page Setup, Print, Quit. *Revert* заменяет активное изображение его последней сохраненной версией. Это действие соответствует закрытию окна без сохранения и его повторному запуску.

Page Setup запускает диалоговое окно, в котором можно контролировать параметры страницы и изображения перед отправлением ее на печать. Здесь можно уменьшить размеры изображения. Для этого следует изменить масштаб в процентах настолько, насколько это необходимо.

При установке флажка в поле *Draw Border* (*Печатать границу*) изображение будет иметь по краям линию в один пиксель.

Установка флажка *Center on Page* (*Центр страницы*) позволяет напечатать изображение в центре страницы, а не в левом верхнем углу (при отсутствии галочки).

Print Title распечатает заголовок изображения вместе с самим изображением.

Selection Only позволяет распечатать только выделенную область.

Галочка в поле *Rotate 90°* разворачивает рисунок на 90° влево перед тем, как напечатать его.

Команда *Print* отправляет на печать активное изображение. Обычно размер печатного изображения чуть меньше размера картинки

на экране. Для коррекции параметров печати пользуйтесь диалоговым окном *Page Setup*.

Quit завершает работу программы ImageJ. Если остались не сохраненные изображения, то будет предложено сохранить их. Также можно выйти из программы, нажав на кнопку *Заккрыть* в заголовке ImageJ.

Наиболее важные опции. Команды Process → Filters. *Gaussian Blur* – это фильтр для сглаживания изображения, построенный на основе функции Гаусса для сглаживания. При запуске появляется диалоговое окно, в котором задается *Sigma* – значение сглаживания (рис. 33).

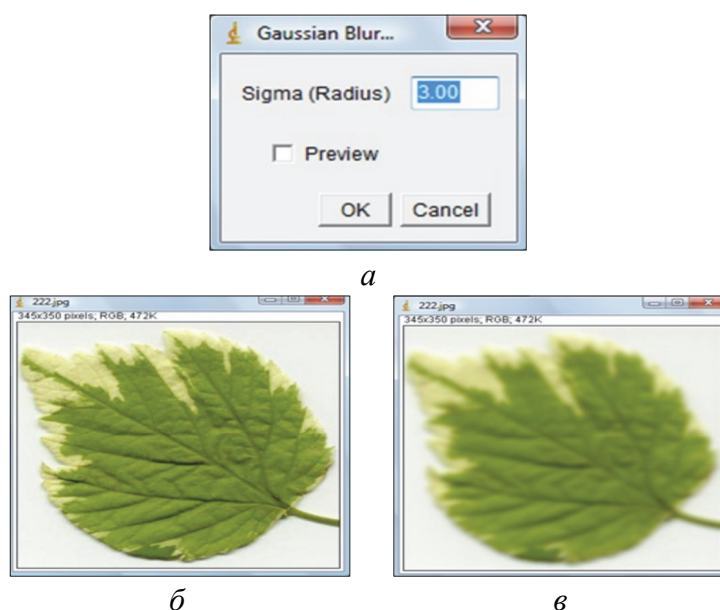


Рис. 33. Диалоговое окно (а) и пример работы *Gaussian Blur* (б, в)

Median уменьшает шум в активном изображении, заменяя каждый пиксель медианным значением соседних пикселей. Размер окрестности пикселей, с которых будет считываться медианное значение, определяется путем ввода ее радиуса в диалоговом окне.

Mean сглаживает изображение, заменяя каждый пиксель средним значением соседних пикселей. Размер окрестности пикселей, с которых будет считываться среднее значение, определяется путем ввода ее радиуса в диалоговом окне.

Minimum заменяет каждый пиксель изображения на пиксель серого цвета, имеющий наименьшее значение в данной окрестности. Окрестность в этом случае также задается вручную в диалоговом окне, которое появляется при запуске команды.

Maximum заменяет все пиксели в окрестности на пиксель, который имеет наибольшее значение в данной окрестности.

Variance – это фильтр для выделения внутренних и внешних краев изображения.

Команды Process → Image Calculator, Subtract Background. *Image Calculator* выполняет арифметические и логические операции между двумя изображениями. При работе со стеками оба стека должны иметь одинаковое количество слайдов. Image1 и Image2 должны быть изображениями одного типа, желательно одинакового размера. В диалоговом окне, которое появляется при выполнении команды, можно выбрать один из 12 операторов, по типу которого будет выполняться операция между изображениями (рис. 34).

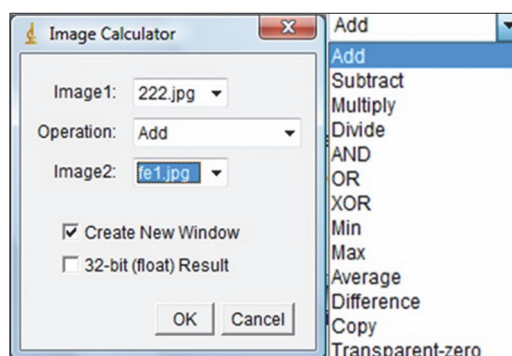


Рис. 34. Диалоговое окно *Image Calculator*

Subtract Background удаляет гладкий непрерывный фон из изображений. Действие данного фильтра основывается на алгоритме rolling ball (крутящийся шар). Это выглядит как шар с заданным радиусом, который катится по задней поверхности изображения и создает фон. В настоящее время в ImageJ используется алгоритм вращающегося параболоида. При запуске появляется диалоговое окно (рис. 35).

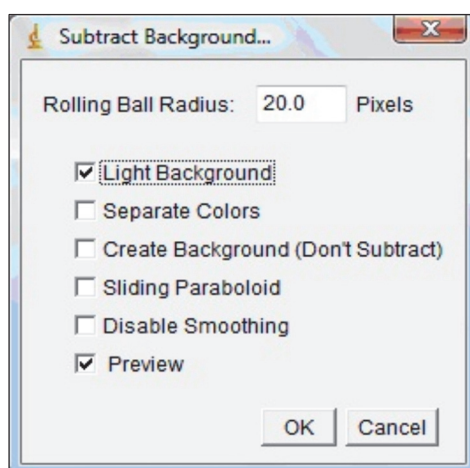


Рис. 35. Диалоговое окно *Subtract Background*

Результаты работы фильтра *Subtract Background* представлены на рис. 36.

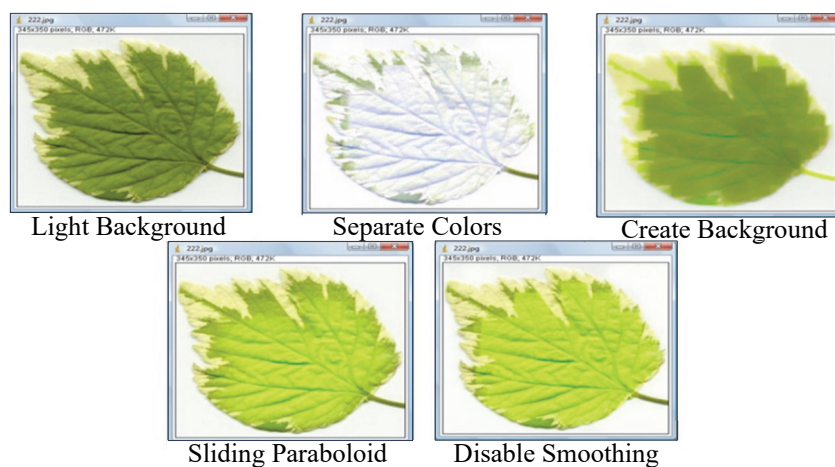


Рис. 36. Примеры работы фильтра *Subtract Background*

Команды Analyze → Measure, Analyze Particles, Clear Results, Set Measurements, Set Scale. Перед работой с этой вкладкой следует подумать, что вы собираетесь измерять. Для этого необходимо вызвать вкладку *Set Measurements* (*Задать измерения*). При запуске этой команды появляется диалоговое окно, которое позволяет задать те параметры, которые необходимо анализировать в меню *Analyze → Measure* и *Analyze → Analyze Particles* (рис. 37).

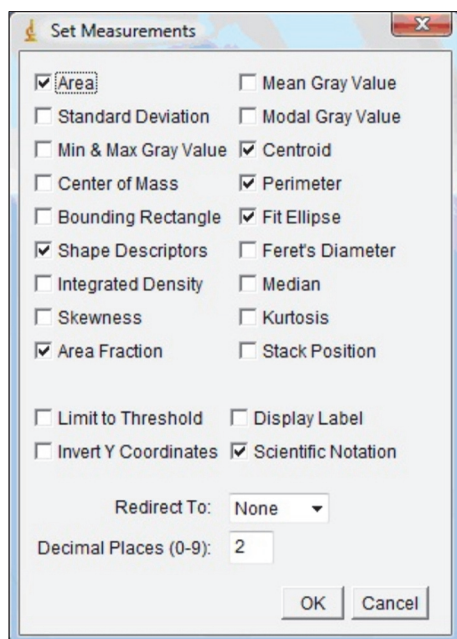


Рис. 37. Диалоговое окно *Set Measurements*

Наиболее полезные параметры приведены ниже. *Area (Площадь)* – площадь выделения (если его нет, то площадь всего изображения) – подсчитывается в квадратных пикселях. Можно изменить параметры измерения, например, на квадратные миллиметры. Для этого используется команда *Analyze → Set Scale*.

Mean Gray Value устанавливает усредненное серое значение внутри выделения. Это усреднение складывается из суммы всех серых пикселей, поделенных на общее количество пикселей на изображении. Можно самим установить калибровочные значения в меню *Analyze → Calibrate*.

Для изображений в формате RGB усредненное серое значение рассчитывается по формуле

$$V = \frac{R + G + B}{3}. \quad (8)$$

Standard Deviation – стандартное отклонение от усредненного серого значения, которое используется при создании этого самого серого значения.

Modal Gray Value – наиболее часто встречающиеся значения серого в данном выделении. В гистограмме такого выделения указанное значение будет обладать наивысшим пиком.

Min & Max Gray Level – минимальное и максимальное значения серого в данном выделении.

Centroid – центральная точка активного выделения. Она формируется на основе всех значений *X* и *Y* координат в активном выделении.

Center of Mass – это усредненное значение всех значений *X* и *Y* координат в активном выделении по яркости.

Perimeter – периметр (длина внешней границы всего выделения).

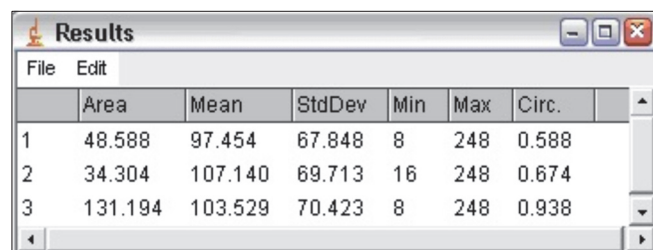
Integrated Density – сумма значений пикселей на изображении или выделении. С математической точки зрения это произведение *Area (Площадь)* и *Mean Gray Value (Усредненное серое)*.

Median – срединное значение пикселей на изображении или выделении.

Area Fraction – доля пикселей на изображении или выделении, которые были выделены красным цветом при помощи команды *Image → Adjust → Threshold*. Если эта команда не была выполнена, то данная опция подсчитывает количество ненулевых пикселей.

Limit to Threshold (Ограничение порога). При включении данной опции в измерение входит только та часть изображения, которая включена в область выделения порогом. Для установления данной границы используется команда *Image → Adjust → Threshold*.

Measure (Измерение) (<Ctrl> + <M>). В зависимости от того, какие параметры выбраны в меню *Measure* → *Set Measurements*, данная команда вычисляет и отображает в специальном окне *Results* статистические данные об изображении (рис. 38).



	Area	Mean	StdDev	Min	Max	Circ.
1	48.588	97.454	67.848	8	248	0.588
2	34.304	107.140	69.713	16	248	0.674
3	131.194	103.529	70.423	8	248	0.938

Рис. 38. Примеры работы команды *Measure*

Analyze Particles (Анализ частиц). Эта команда измеряет какую-либо часть изображения или порог. Работает по принципу сканирования всего изображения или выделения, пока не находит края объекта. После этого выделенный объект описывается с помощью инструмента *Wand Tool* (Волшебная палочка), измеряется командой *Measure*, заполняет его, чтобы сделать невидимым, и продолжает сканирование, пока не достигнет конца изображения или выделения. Чтобы остановить процесс, используется команда *ESC*.

Для более четкого выделения порога применяется команда *Image* → *Adjust* → *Threshold*. Для работы с RGB-изображениями они должны быть предварительно конвертированы командами *Image* → *Adjust* → *Color Threshold* или *Process* → *Binary* → *Make Binary*. В противном случае появится сообщение об ошибке. Если эти условия соблюдены, то откроется диалоговое окно для настройки *Analyze Particles* (рис. 39).

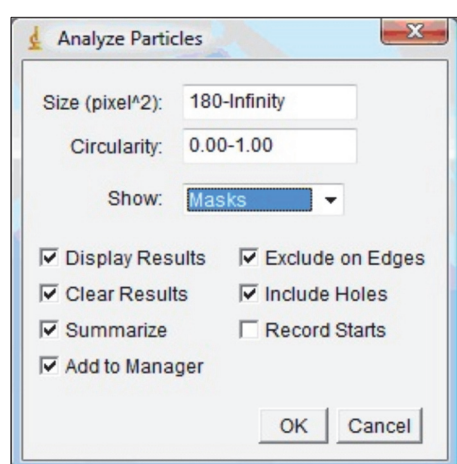


Рис. 39. Диалоговое окно настройки *Analyze Particles*

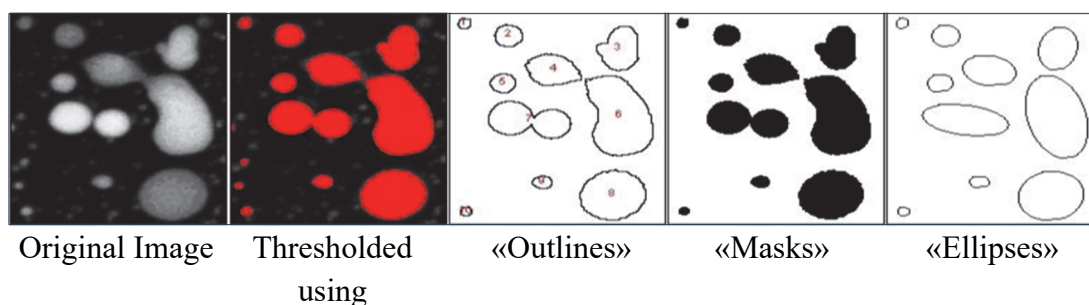


Рис. 40. Результаты работы *Analyze Particles* с различными параметрами

На рис. 40 продемонстрированы результаты работы анализа частей.

Команды Analyze → Histogram, Plot Profile. *Histogram* (Гистограмма) (<Ctrl> + <H>) вычисляет и отображает гистограмму распределения серых значений на активном изображении или выделении (рис. 41).

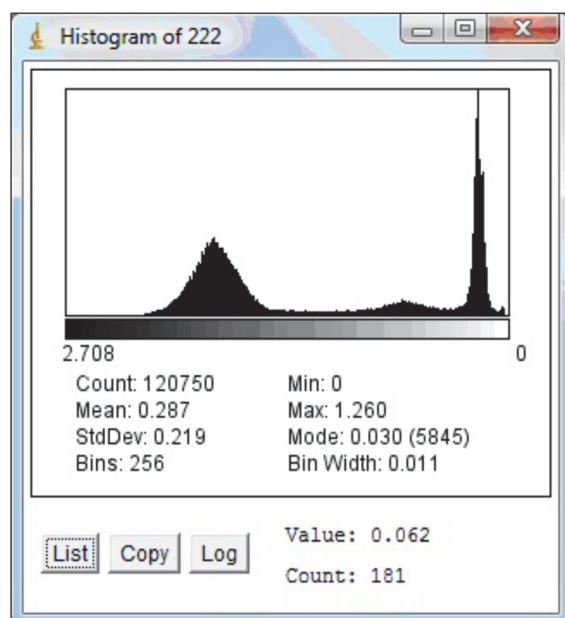


Рис. 41. Гистограмма изображения

Также при выполнении данной команды рассчитывается общее количество пикселей, среднее, минимальное и максимальное значения, стандартное отклонение и некоторые другие значения. Данную гистограмму можно копировать в буфер обмена (*Copy*) или отобразить в отдельном окне при помощи команды *List*.

Plot Profile (График профиля) (<Ctrl> + <K>) отображает в двумерной графике интенсивность распределения пикселей на выделении (рис. 42).

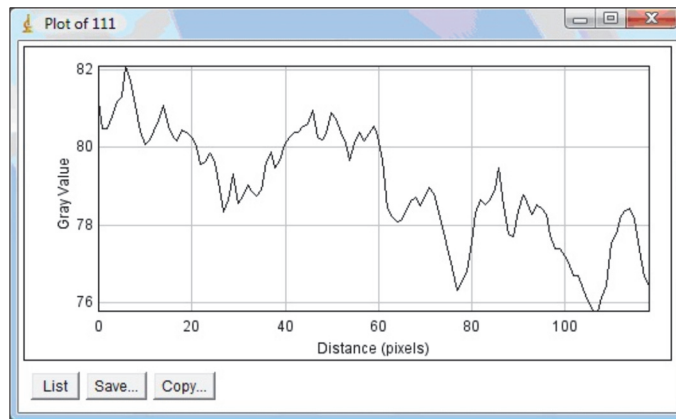


Рис. 42. График профиля

Surface Plot (*График поверхности*) отображает трехмерный график интенсивности распределения пикселей на активном выделении. Работает с черно-белыми изображениями (8-, 16-, 32-битными) или псевдоцветными изображениями. В противном случае будет появляться сообщение об ошибке с указанием о необходимости ввести соответствующие изменения.

Команды Analyze → Tools → Fractal Box Count (расчет фрактальной размерности). Показывают число областей увеличивающегося размера, необходимых для вписания в них бинарных объектов изображения (рис. 43).

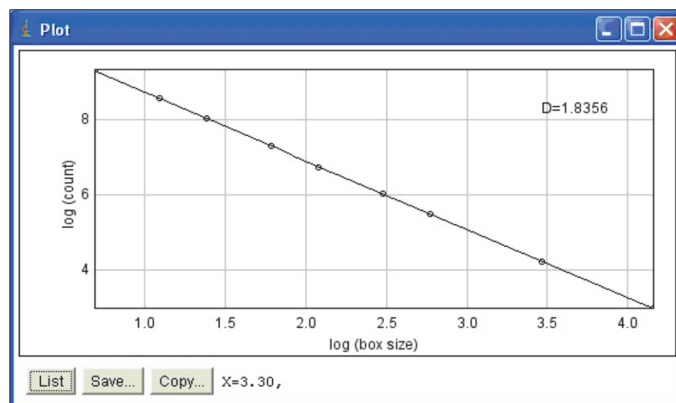


Рис. 43. График анализа размеров областей и их числа, необходимого для вписания всех бинарных объектов

Редактирование и анализ изображений с помощью ImageJ.
Отмена предыдущего действия (Undo). *Edit → Undo* отменяет предыдущее действие. Возможна отмена только одного действия.

File → Revert (Вернуть) отменяет все выполненные манипуляции и переводит изображение в исходный после открытия вид.

Выделив часть изображения с помощью прямоугольного выделения командой *Image* → *Crop* (Обрезка), можно обрезать не входящие в выделение участки. После выделения участка на изображении команда *Edit* → *Clear Outside* (Очистить снаружи) очистит все участки, не попавшие в зону выделения. Команда *Edit* → *Clear* очистит участки внутри выделенной области.

Ниже приведен пример выполнения задания по коррекции фона изображения.

Откройте изображение и обратите внимание, что нижняя часть изображения намного темнее, хотя окрашивание выглядит однородным, что указывает на неравномерное освещение (рис. 44).

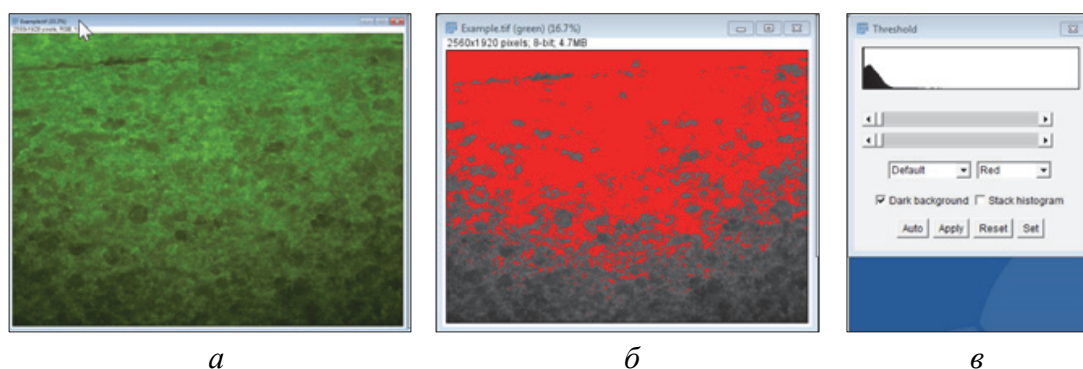


Рис. 44. Открытое изображение:

a – исходное изображение; *б* – перевод изображения в красный канал;
в – вкладка для перевода изображения в красный канал

Выберите изображение красного канала и перейдите в меню *Process* → *Filters* → *Gaussian Blur*. Используйте *Sigma* (Radius), чтобы создать изображение для вычитания. Включите предварительный просмотр, чтобы проверить эффект на изображении, прежде чем нажать кнопку <OK> (рис. 45).

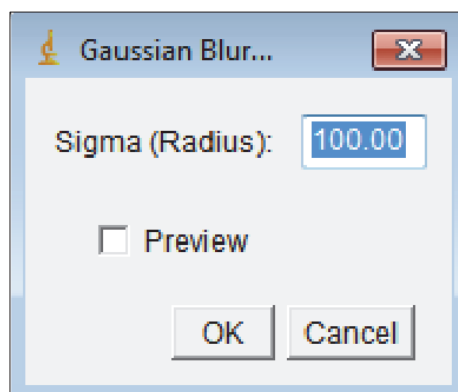


Рис. 45. Диалоговое окно *Gaussian Blur*

Перейдите в меню *Process* → *Image Calculator*. Выберите изображение зеленого канала (Example.tif (green)) для изображения 1 и размытое изображение красного канала (фон) (Example.tif (red)) для изображения 2. Используйте операцию *Divide* и другие параметры, как указано на рис. 46.

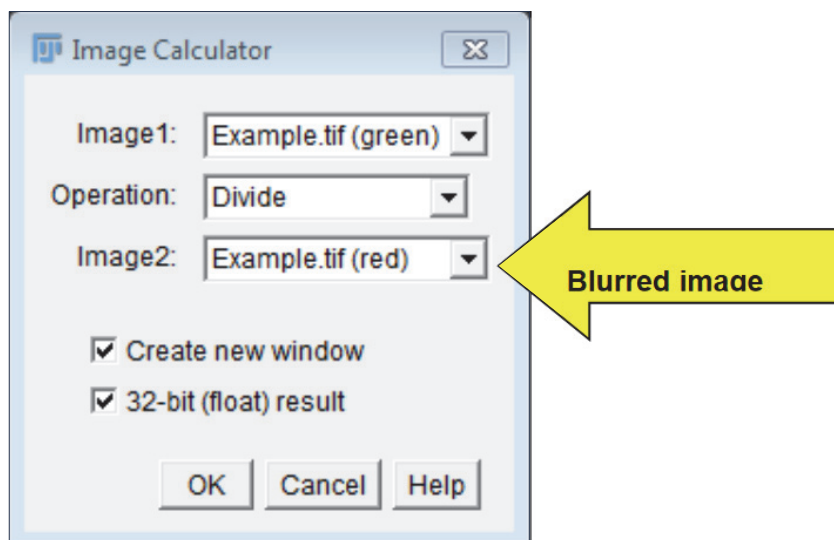


Рис. 46. Диалоговое окно *Image Calculator*

Исходное изображение зеленого канала и обработанное изображение с LUT представлены на рис. 47.

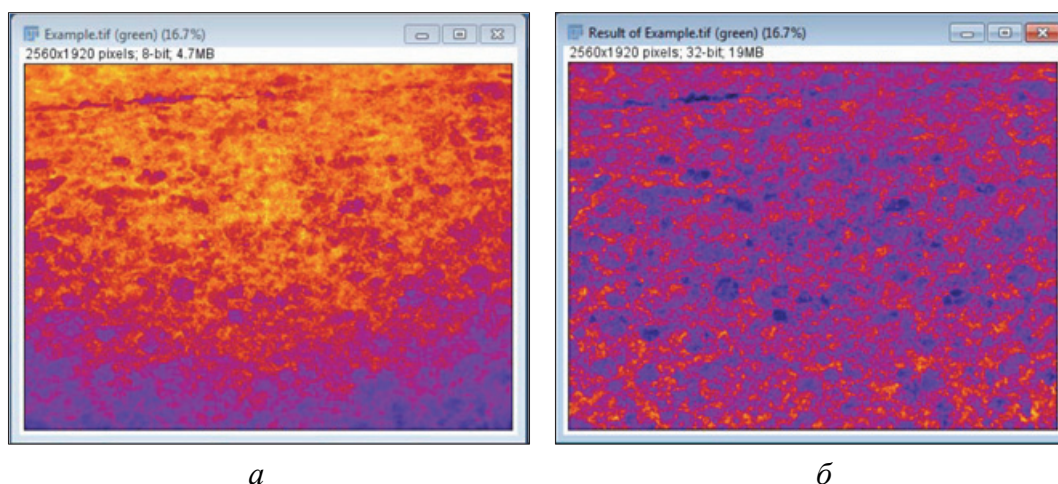


Рис. 47. Исходное (а) и обработанное (б) изображение зеленого канала с LUT

Примените *Green LUT* к обработанному изображению, выбрав *Image* → *LookUp Tables* → *Green*. Измените тип изображения обратно на *RGB Color*, перейдя в *Image* → *Type* → *RGB Color* (рис. 48).

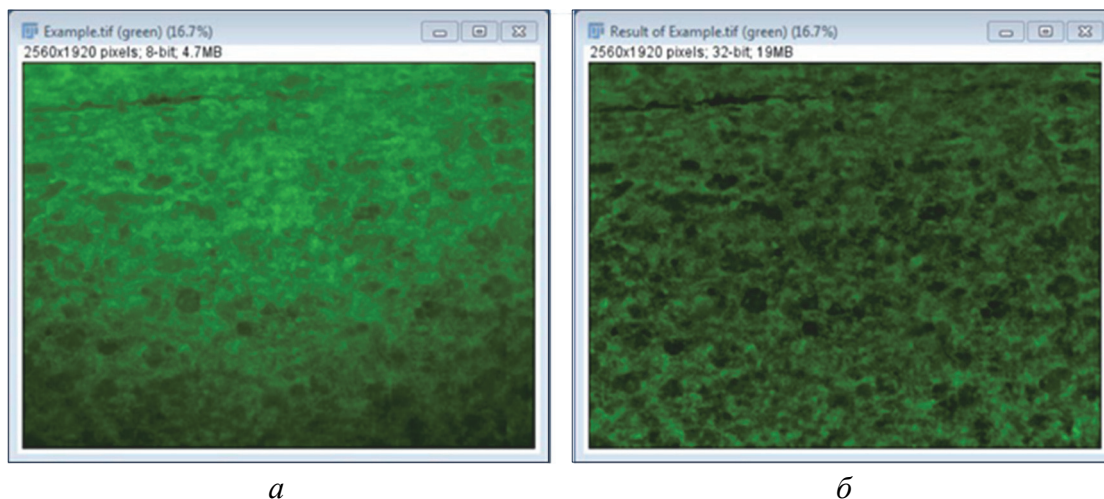


Рис. 48. Исходное (*а*) и обработанное (*б*) изображение в исходном цвете RGB

Фон исчез, так что изображение выглядит более четким. Обратите внимание, что, если вы собираетесь анализировать изображение, например, на предмет интенсивности, вам следует получить фоновое изображение с теми же настройками, что и ваше реальное изображение, и использовать его для процесса коррекции для каждого изображения.

ГЛАВА 8

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МИКРОСТРУКТУРЫ ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Разработка альтернативных методов, позволяющих оценивать качество волокнистого композиционного материала, в частности бумаги и картона, в современных условиях является актуальной задачей, которая решает проблему ограниченного доступа к научным лабораториям. Заменить частично сложное дорогостоящее оборудование можно путем применения новых цифровых технологий. Ключом к цифровизации исследований свойств бумаги и картона является изучение их микроструктуры с помощью современных технологий.

Специфика микроструктуры позволяет определить ряд показателей. С помощью цифровой обработки изображений микроструктуры, полученных электронным микроскопом, можно оценить некоторые физико-механические свойства бумаги и картона, равномерность формования и распределения крахмала, пористость. Основным инструментом цифровой обработки микроструктуры бумаги и картона является программа ImageJ. Целый ряд физико-механических показателей можно оценить, исследовав микроструктуру поперечного среза бумаги и картона, выполненного с помощью современных методов подготовки образцов для электронной микроскопии. Проведенные ранее исследования показали, что микроструктура бумаги и картона во многом определяет физико-механические свойства.

При цифровой обработке микроструктуры волокнистого композиционного материала важную роль играет выбор программы для оценки изображения.

Программа и ее функционал определяют качество и время измерений.

Принципиально важно, в каком формате изображение микроструктуры обрабатывается. Векторный формат работы с файлом (программы AutoCAD, CorelDRAW и т. д.) позволяет оценить с высокой точностью площадь, периметр объектов, но для их формирования понадобится ручная обводка контуров, что требует больших затрат времени. Растровый формат работы с файлом (программы Adobe Photoshop, ImageJ, IP SQUARE и т. д.) позволяет автоматизировать и ускорить процесс

обработки, но программы определяют размеры, рассчитывая количество пикселей того оттенка цвета, которому соответствует исследуемая область. Точность оценки в программе растровой обработки файла будет ниже, если кроме исследуемой области будут захвачены области с идентичным оттенком цвета.

Поэтому сравнительная оценка микроструктуры волокнистого композиционного материала с помощью современных цифровых технологий представляется важным и актуальным направлением, которое позволит разработать высокоточный экспресс-метод оценки показателей бумаги и картона, что является базой для создания прибора для контроля качества бумаги и картона на предприятиях.

Для оценки равномерности распределения срезов волокон были использованы программы AutoCAD, ImageJ, Excel, с помощью которых установлены площади среза материала.

По результатам сканирующей электронной микроскопии, оснащенной современным оборудованием для подготовки проб, включающим ионную резку материала, было получено изображение поперечного среза (рис. 49).

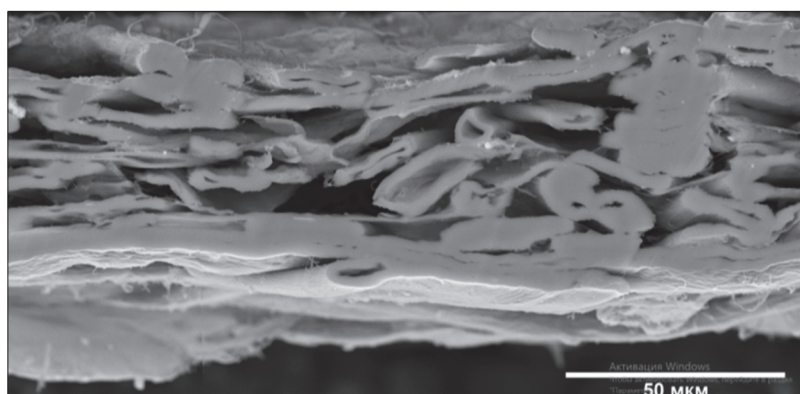


Рис. 49. Изображение поперечного среза двухслойного волокнистого композиционного материала

В программе AutoCAD была выделена 51 область среза волокнистого материала, для каждой из которых определена площадь (рис. 49). Погрешность измерения при оценке площади в программе AutoCAD (векторный формат файла) связана с ошибками нанесения линии вдоль контура среза волокнистого материала, которая не превышает 1%. Недостатком метода является длительность ручной обводки областей среза волокон, а достоинством – высокая точность.

При оценке площади срезанных областей в растровых форматах программы определяют области с одинаковыми оттенками цветов и

предоставляют значение площади по количеству пикселей, соответствующих определенному цвету. При этом может быть выделена область волокнистого материала, которая не находится в плоскости среза. Например, на представленном ранее изображении поперечного среза волокнистого материала области нижней и верхней поверхностей материала в некоторых местах имеют практически одинаковый оттенок с областью среза волокон, находящейся вне плоскости среза. Программ, работающих в растровом формате, много, но наиболее популярной и адаптированной под анализ микроскопических исследований является ImageJ.

Для оценки площади областей среза волокон с помощью программы ImageJ необходимо перевести существующий файл в формат «8-bit» (рис. 50), который позволит сократить количество цветовых оттенков.

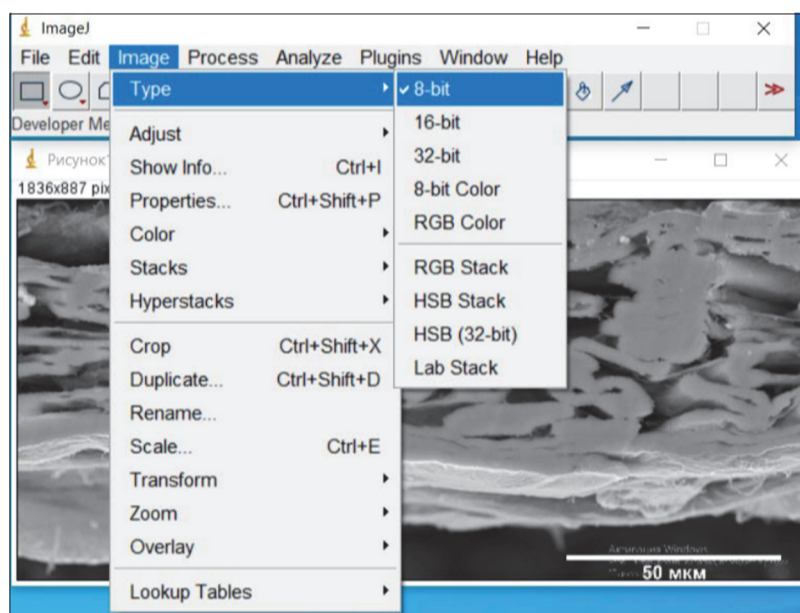


Рис. 50. Работа в программе ImageJ: перевод изображения поперечного среза волокнистого материала в формат «8-bit»

На следующем этапе в программе ImageJ осуществляется настройка контрастности изображения командой *Threshold*. Выбор контрастности имеет важное значение для точности получаемых значений площадей областей среза в растровом формате работы с изображением. Автоматически преобразованная контрастность снимка микроструктуры поперечного среза в ImageJ связана с большой погрешностью, при этом диапазон оттенков находится в пределах от 98 до 255 (рис. 51). Рассчитанная программой площадь отличается от площади, установленной в векторном формате, более чем на 50%.

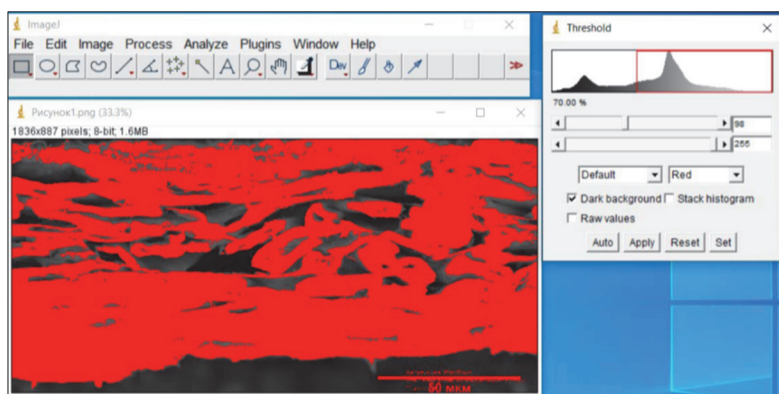


Рис. 51. Результат выделения областей среза в программе ImageJ в режиме Auto

Поэтому для дальнейших исследований необходимо подобрать контрастность таким образом, чтобы она максимально была приближена по площади областей среза волокон, установленной при работе с изображением в векторном формате. В некоторых случаях область среза может быть выделена отдельно, чтобы нижняя и верхняя поверхность не создавали дополнительную погрешность в измерении. Для этого существует два способа: во-первых, можно получить два снимка поперечного среза под небольшими углами в несколько градусов, чтобы была видна в одном случае только верхняя поверхность, в другом случае – только нижняя. Затем соединив два снимка, можно добиться удаления областей, соответствующих поверхности бумаги (рис. 52). Во-вторых, можно удалить область в программе ImageJ.

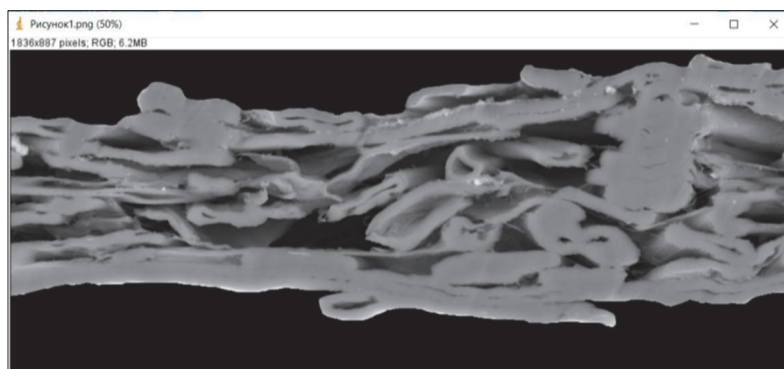


Рис. 52. Выделение области поперечного среза волокнистого композиционного материала

Важным этапом обработки изображения поперечного среза волокнистого композиционного материала в программе ImageJ является ручная настройка контрастности изображения.

После «бинаризации» этого изображения рассчитывается площадь среза, которая соответствует области черного цвета. В данном случае площадь среза, полученная при расчете в программе растрового формата работы с изображением, составила 6178 мкм², что на 22,5% больше значения, полученного при обработке изображения в векторном формате изображения. Большая погрешность связана с тем, что при расчете программа, работающая с растровым форматом изображения, учитывает также области, которые не находятся в плоскости среза, но имеют идентичный цветовой оттенок. Это «проблемные участки», которых немного, но они так же, как и в случае с поверхностью, требуют ручного исключения.

Программа ImageJ позволяет выделить «проблемные области» и удалить их. После удаления «проблемных участков» вновь рассчитывается площадь области, закрашенной черным цветом. Если расчет ведется в другой программе, например IP SQUARE, то необходимо использовать элемент с заведомо известной площадью.

Данные по поверхности среза волокон, полученные с помощью программы, работающей в растровом формате, сопоставляются с данными, полученными в векторном формате работы (таблица).

Данные расчета поверхности среза волокнистого композиционного материала, полученные с помощью программ, работающих в векторном и растровом форматах файлов

№ п/п	Этапы расчета площадей среза волокнистого композиционного материала в поперечном срезе	Площадь, мкм ²	Погрешность, %
1	Параметр Treshold в режиме Auto 98, 255 (ImageJ)	17 287	72,3
2	Параметр Treshold в режиме Auto 98, 255 (удаление областей, соответствующих поверхности волокнистого материала) (ImageJ)	12 657	62,1
3	Параметр Treshold 120, 240 (после «бинаризации» изображения) (ImageJ)	6178	22,5
4	Параметр Treshold 120, 240 (после «бинаризации» изображения и удаления «проблемных участков» в микроструктуре поперечного среза) (ImageJ, IP SQUARE)	4771	0,5
5	Общая площадь среза волокон, установленная при работе в векторном формате файла (с помощью программы AutoCAD)	4791	0

Из таблицы видно, что при ручной установке оттенка цветов в пределах 120 и 240 погрешность измерения площади среза волокнистого материала снизилась с 62,1 до 22,5%, хотя это также много. Удаление «проблемных участков» позволило приблизить площадь среза к той, которая была установлена при обработке изображения с помощью программы, работающей в векторном формате. По установленным значениям оттенков цветов (120, 240) можно осуществлять измерения других снимков поперечных срезов (или поперечного среза с большой протяженностью) при условии, если электронная микроскопия осуществлялась в одинаковых условиях (тот же угол, под которым делался снимок, то же освещение, оборудование для подготовки образцов).

Таким образом, комбинация двух принципов обработки изображений поперечного среза волокнистого композиционного материала (работа с векторным и растровым форматами изображения) позволяет повысить точность измерения и сократить временные затраты. Приведенные в таблице пункты 1–5 являются этапами обработки срезов волокон. Их последовательность представляет собой краткое описание метода, сущность которого заключается в комбинации использования программ векторного и растрового форматов работы с изображением микроструктуры волокнистого материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
2. Шапиро, Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М.: Бином: Лаборатория знаний, 2006. – 763 с.
3. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений / У. Прэтт. – М.: Мир, 1982. – 790 с.
4. Гашников, М. В. Методы компьютерной обработки изображений / М. В. Гашников; под ред. В. А. Сойфера. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2003. – 784 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Основные сведения о цифровой фиксации изображений	5
Глава 2. Основные стадии цифровой обработки изображений.....	9
Глава 3. Бинарные изображения.....	17
Глава 4. Методы улучшения изображений	20
Глава 5. Основные положения теории цвета	30
Глава 6. Программные средства обработки изображений.....	44
Глава 7. Функциональные возможности и области применения ImageJ	59
Глава 8. Сравнительная оценка микроструктуры волокнистого композиционного материала с помощью цифровых технологий	82
Литература	88

Учебное издание

Зильберглейт Марк Аронович
Грудо Сергей Казимирович
Коренькова Анастасия Александровна
Мидуков Николай Петрович

**АППАРАТНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ
СРЕДСТВА ОЦЕНКИ НЕОДНОРОДНОСТИ
ЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Учебно-методическое пособие

Редактор *Е. С. Ватеичкина*
Компьютерная верстка *П. В. Ковальцова*
Дизайн обложки *Д. А. Полешова*
Корректор *Е. С. Ватеичкина*

Подписано в печать 07.10.2025. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 5,2. Уч.-изд. л. 5,4.
Тираж 50 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение:
УО «Белорусский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/227 от 20.03.2014.
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.