

На правах рукописи

ЖУКОВСКАЯ ИНГА АНАТОЛЬЕВНА

**КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА
ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЕЩЕСТВ
РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ижевск 2014

Работа выполнена в Совместной с ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН научно-учебной лаборатории
«Компьютерные технологии в дифракционной диагностике материалов»
Санкт-Петербургского государственного университета сервиса и экономики
(Новгородский филиал)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Ткаль Валерий Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Асадчиков Виктор Евгеньевич
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН

доктор технических наук, профессор
Мурынов Андрей Ильич
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Ижевский государственный технический университет имени
М.Т. Калашникова»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Псковский государственный университет».

Защита диссертации состоится «____» _____ 2014 г. в ____ часов в ауд. ____
на заседании диссертационного совета ДМ212.275.03 в Удмуртском государственном уни-
верситете по адресу: 426037, Ижевск, ул. Университетская, 1.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим
направлять по адресу: 426034, Удмуртская Республика, г. Ижевск, ул. Университетская, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Удмуртского государственного
университета. Автореферат размещен на официальном сайте Минобрнауки РФ
<http://www.mon.gov.ru> и УдГУ http://v4.udsu.ru/science/avtoref_2011_03
«____» _____ 2014 г.

Автореферат разослан «____» _____ 2014 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент



Крылов П.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Эффективное решение многих задач, стоящих перед наукой и производством, невозможно без разработки и внедрения современных высокочувствительных и универсальных методов экспресс-диагностики и контроля качества объектов различной физико-химической природы, включая применение на практике объективных количественных критериев, уменьшающих субъективный фактор при оценке их качества. Эти методы должны быть простыми, по возможности неразрушающими, надежными и объективными, высокочувствительными и экспрессными, доступными для широкого круга исследователей и предприятий, применимыми для исследования веществ различной физико-химической природы.

Современная микро- и наноэлектроника основана на применении совершенных монокристаллических материалов, тонких пленок, на внедрении новых технологий, а также на использовании для исследования материалов и разнообразных методов оценки их качества. Надежное выявление дефектов кристаллической структуры позволяет выпускать изделия микро- и наноэлектроники высокого качества. Наличие в активной области приборов и микросхем даже одного микродефекта приводит к нестабильности и деградации параметров и характеристик, к снижению надежности как самих приборов и микросхем, так и изделий на их основе. Важной задачей остается повышение чувствительности и разрешения существующих, а также разработка новых более экспрессных методов регистрации и идентификации различных дефектов структуры кристаллической решетки. Методы рентгеновской топографии и поляризационно-оптический анализ (метод фотоупругости) во многом отвечают перечисленным выше требованиям.

К факторам, затрудняющим расшифровку экспериментального контраста, формируемого дефектами структуры, относятся слабая контрастность, фоновая неоднородность и зернистость фотоэмульсии. Их устранение позволяет повысить надежность выявления и однозначность идентификации дефектов структуры различного типа. Наиболее перспективными методами устранения зашумляющих факторов являются методы, основанные на цифровой обработке экспериментального контраста, которая повышает его качество, уменьшает субъективный фактор, обусловленный визуальным контролем, и дает возможность введения объективных количественных критериев оценки изображений дефектов. При этом достигается надежная расшифровка экспериментального контраста, более однозначная идентификация дефектов структуры, выбор наиболее оптимального диагностического метода и метода цифровой обработки.

Интерес к использованию компьютерных технологий характерен и для других отраслей экономики, в частности, пищевой промышленности. Большинство применяемых диагностических методов требуют, как правило, дорогостоящего оборудования, химических реактивов, высокой квалификации специалистов и не являются экспрессными. В основе многих из них

лежит визуальный контроль качества сырья и готовой продукции. Человеческий глаз уступает техническим средствам при регистрации изменений цветовых характеристик исследуемых объектов в процессе их переработки и производства, хранения, транспортировки и воздействия различных внешних факторов. К важнейшим характеристикам, напрямую связанным с качеством продукции и с изменениями, происходящими в ней, относится цвет. Разработка эффективных методов цифровой экспресс-диагностики качества сырья, продуктов питания, технологических процессов, основанных на регистрации изменений цветовых характеристик, и введение количественных критериев оценки их качества также являются важной научной и практической задачей, решению которой и посвящена данная работа.

Цель работы:

- разработка и дальнейшее совершенствование методов цифровой обработки экспериментального контраста (изображения), формируемого объектами различной физико-химической природы;
- повышение экспрессности и введение объективных количественных критериев оценки качества исследуемых объектов и происходящих в них изменений при воздействии различных внешних факторов, основанных на регистрации цветовых характеристик;
- исследование и визуализация цифровыми методами процесса посола мяса и определение его количественных параметров и характеристик.

Объекты исследования: теоретические и экспериментальные изображения дефектов структуры монокристаллов, полученные поляризационно-оптическим анализом и рентгеновской топографией на основе эффекта Бормана (метод РТБ); мясное сырье отечественных и зарубежных производителей (говядина и свинина); мясная продукция (колбасные изделия); мясо цыплят-бройлера, подвергнутое различным способам посола многокомпонентной смесью (соль-перец-чеснок); речная и питьевая вода; пиво и вино разных производителей.

Решаемые проблемы и исследуемые процессы: выявление и идентификация в монокристаллах на фоне зашумляющих факторов дефектов структуры различного типа; повышение экспрессности цифровой обработки экспериментального контраста на основе дискретного вейвлет-анализа; поиск простых и надежных количественных критериев анализа экспериментального контраста, уменьшающих субъективность его расшифровки и идентификации дефектов структуры, выбора оптимального метода цифровой обработки и вейвлет-базиса; оценка влияния различных внешних факторов на качество пищевой продукции (условия хранения, заморозка и разморозка); визуализация процесса посола мяса многокомпонентной смесью и определение его количественных параметров и характеристик (глубины и скорости проникновения смеси и ее компонентов); оценка эффективности очистки питьевой воды; регистрация процесса старения пива и частиц различной физико-химической природы, содержащихся в нем, без применения специальных красителей; выявление фальсифицированной винной продукции.

Методы исследования: поляризационно-оптический анализ; рентгеновская топография на основе эффекта Бормана; методы цифровой обработки экспериментального контраста, основанные на анализе яркостных и частотных (дискретный вейвлет-анализ) характеристик; гостированные методики оценки качества сырья и готовой продукции, применяемые на предприятиях пищевой промышленности и водоочистительных станциях.

Научная новизна работы.

1. Для зашумленного теоретического контраста монокристаллического 6H-SiC, реставрированного цифровой обработкой вейвлетами Мейера (Dmey) и Симлета с масштабом функции 8 (Sym8), проведена количественная оценка качества устранения шума с использованием метрик PSNR (отношение сигнала к шуму), MSE (среднеквадратичное отклонение), SSIM (показатель структурного сходства) и яркостных характеристик.

2. Для различных типов дефектов структуры (краевой и правовинтовой дислокаций, когерентных включений типа «вакансия» и «внедрение») проведена количественная оценка качества цифровой обработки теоретического и экспериментального контрастов монокристалла 6H-SiC (незашумленного и зашумленного) вейвлетами Sym8 и Dmey, основанная на анализе яркостных характеристик, профилей интенсивности и разностного контраста.

3. На примере поляризационно-оптического контраста монокристалла 6H-SiC проведена количественная оценка эффективности различных методик цифровой обработки при устранении фоновой неоднородности. Показано, что методика, основанная на выделении при дискретном вейвлет-анализе контраста, формируемого фоновой неоднородностью и ее вычитании из исходного контраста с последующим гаусс-размытием, построением разностного контраста и коррекцией динамического диапазона, уменьшает время обработки в 10–12 раз.

4. Показана возможность организации количественной и качественной экспресс-диагностики сырья и готовой пищевой продукции (мясо, колбасные изделия, вода, пиво, вино), основанной на регистрации изменений цвета по: разностному контрасту, областям равного контраста, профилям интенсивности и яркостным характеристикам.

5. Показана возможность визуализации цифровыми методами процесса посола мяса цыплят-бройлера смесью соль-перец-чеснок, определения глубины и скорости проникновения посолочной смеси её компонент в мясо по цветовым характеристикам (разностному контрасту, областям равного контраста, профилям интенсивности и яркостным характеристикам), а также при разложении оцифрованного изображения по цветовым каналам.

Практическая значимость.

1. На основе дискретного вейвлет-анализа разработана экспресс-методика устранения явления элайзинга и фоновой неоднородности экспериментального контраста вычитанием из исходного контраста фоновой неоднородности с последующим гаусс-размытием, построением разностного контраста и коррекцией динамического диапазона.

2. Предложена методика количественной оценки качества цифровой обработки, эффек-

тивности диагностических методов и выбранных вейвлет-базисов, основанная на построении разностного контраста (нулевого и ненулевого) и яркостных характеристик, обладающая по сравнению с метриками PSNR, MSE и SSIM большей простотой и экспрессностью.

3. Разработаны и апробированы в условиях производства цифровые экспресс-методики контроля качества мясного сырья, мясной продукции и влияния на них различных внешних факторов, основанные на регистрации изменений цветовых характеристик.

4. Разработаны четыре цифровые экспресс-методики визуализации процесса посола мяса цыпленка-бройлера смесью соль-перец-чеснок и определения по изменению цветовых характеристик количественных характеристик процесса (глубины и скорости проникновения смеси и ее компонент), совпадающие с предложенными теоретическими моделями.

5. Показана возможность выявления в пиве без применения специальных красителей частиц различной физико-химической природы, а также возможность исследования процесса старения и стабилизации пива, основанная на регистрации изменений цвета (построении разностного контраста, яркостных характеристик и профилей интенсивности).

6. Разработана и апробирована на водоочистительной станции цифровая экспресс-методика диагностики качества речной и питьевой воды, основанная регистрации изменений цветовых характеристик.

7. Разработана цифровая экспресс-методика выявления фальсифицированной винной продукции, основанная на сравнении исследуемой продукции с эталонными образцами и регистрации изменений цветовых характеристик.

8. Цифровые методики позволили зарегистрировать не только качественные изменения цветовых характеристик исследуемого вещества, но и дать количественную оценку этих изменений, снизить субъективность визуального контроля.

Методики могут быть применены на предприятиях пищевой промышленности и в организациях, контролирующих качество пищевых продуктов, их производство, хранение и реализацию через торговую сеть, например, торговой инспекцией и Роспотребнадзором.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Уменьшение 10–12 раз времени обработки экспериментального контраста, содержащего дефекты структуры и сильную фоновую неоднородность, устранение элайзинга достигается применением дискретного вейвлет-анализа и методики, основанной на выделении из исследуемого изображения фоновой неоднородности с последующим ее вычитанием из исходного изображения, гаусс-размытием, построением разностного контраста и коррекцией динамического диапазона.

2. Уменьшение субъективного фактора, связанного с визуальным контролем экспериментального контраста и идентификацией дефектов структуры, с оценкой эффективности различных диагностических методов, выбора оптимального вейвлет-базиса и с регистрацией изменений цветовых характеристик объектов различной физико-химической природы, до-

стигается применением количественных критериев – яркостных характеристик, разностного контраста (нулевого и ненулевого), областей равного контраста и профилей интенсивности.

3. Визуализация процесса посола мяса и определение его количественных характеристик (глубины и скорости проникновения смеси и её компонент) достигается построением яркостных характеристик, разностного контраста (нулевого и ненулевого), областей равного контраста, профилей интенсивности и разложением оцифрованного изображения по цветовым каналам.

Обоснованность и достоверность теоретических и экспериментальных исследований доказываются широкой апробацией основных результатов работы на конференциях и семинарах различного ранга, публикациями в академических журналах, изданием в Германии в течение 2011-2013 годов в соавторстве со своими коллегами 2 научных монографий по данной тематике, а также применением современных методов и оборудования.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены:

- тремя докладами на Пятом международном научном семинаре «Современные методы анализа дифракционных данных (топография, дифрактометрия, электронная микроскопия)», Великий Новгород, 2011 г.;
- тремя докладами на Третьей международной молодёжной научной школе-семинаре «Современные методы анализа дифракционных данных (дифракционные методы для нанотехнологии)», Великий Новгород, 2011 г.;
- докладом на 11th Biennial Conference on High Resolution X-Ray Diffraction and Imaging (ХТОР 2012), г. Санкт-Петербург, 2012 г.;
- докладом на конференции «Рентгеновская оптика 2012», Черноголовка, 2012 г.;
- двумя докладами на конференции «Лауэ 100», Нижний Новгород, 2012 г.;
- четырьмя докладами на Четвертой международной молодежной научной школе-семинаре «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики». Великий Новгород, 19 – 27 августа 2013 г.;
- двумя докладами на Шестом международном научном семинаре «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики». Великий Новгород, 19 – 27 августа 2013 г.;
- четырьмя докладами на 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-17 Conference). Warsaw, Poland, August 11-16, 2013;
- тремя докладами на Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures and Electron, Positron, Neutron and X-ray Scattering under External Influences. September 23-27, 2013, Yerevan, Armenia;
- тремя докладами на Пятой международной конференции «Кристаллофизика 21-го века» и Третьих московских чтениях по проблемам прочности материалов. НИТУ «МИСиС», г. Москва, 28 октября – 2 ноября 2013 г.

- на научном семинаре в Псковском государственном университете (г. Псков);
- на конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов Новгородского филиала СПбГУСЭ за 2011–2013 г.;

Публикации. По теме диссертации опубликована 28 работ, из них: 2 научные монографии, изданные в Германии, 2 статьи в академическом журнале, рекомендованном ВАК, остальные 24 работы представляют собой расширенные тезисы докладов на международных и российских конференциях и семинарах. Перечень основных публикаций приведен в выводах и основных результатах работы.

Личный вклад автора. Основные экспериментальные результаты, представленные в работе, получены соискателем или при непосредственном его участии. Постановка задач диссертационного исследования, определение методов их решения и интерпретация результатов также выполнены при непосредственном участии соискателя совместно с соавторами опубликованных работ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, содержащего 226 наименований. Объём диссертации составляет 207 страниц, включая 95 рисунков и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности проводимых в данной диссертации исследований, сформулирована цель работы, приведены научные положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава состоит из 12 разделов и представляет собой краткий литературный обзор основных методов регистрации и особенностей формирования изображений дефектов структуры различного типа. *В разделе 1.1.* рассматривается формирование экспериментального контраста в методах Ланга, РТБ и Берга-Баретта-Ньюкирка, а также определены области их наиболее эффективного применения. *В разделе 1.2.* рассматривается метод фотоупругости и формирование экспериментального контраста. *Раздел 1.3* посвящен описанию метода топофотографии, представляющего собой комбинацию рентгеновской топографии и микрофотографии и позволяющего получать по дифракционным данным трехмерное изображение дефектов в кристалле. *В разделе 1.4* рассматриваются приемы расшифровки экспериментального контраста и идентификации дефектов структуры, моделирования теоретического контраста дефектов структуры различного типа. *В разделе 1.5* описываются основные факторы, затрудняющие расшифровку экспериментального контраста и надежную идентификацию дефектов структуры: слабая контрастность, фоновая неоднородность и зернистость. *В разделе 1.6* рассматриваются направления цифровой обработки контраста: улучшение качества, количественные измерения, распознавание и компрессия. *Раздел 1.7* посвящен краткому описанию ранее апробированных методов цифровой обработки, используемых для устранения основных зашумляющих факторов, базирующихся на анализе яркостных характеристик

экспериментального контраста. Проводится сравнение их эффективности и применимости. В разделе 1.8 перечисляются методы, основанные на частотном анализе экспериментального контраста. Раздел 1.9 содержит краткое изложение теории дискретного вейвлет-анализа. В разделах 1.10 и 1.11 рассматриваются особенности цифровой обработки, основанной на дискретном вейвлет-анализе, и ранее полученные результаты устранения фоновой неоднородности и зернистости экспериментального контраста, содержащего различные дефекты структуры. Сравняется эффективность обработки изображений при использовании различных методов и вейвлет-базисов. Делается вывод о перспективности и наибольшей эффективности методов, основанных на частотном анализе экспериментального контраста. Раздел 1.12 содержит выводы и постановку основных задач данного диссертационного исследования, а именно: 1) разработка методики разделения близко расположенных дефектов структуры; 2) разработка простых количественных критериев оценки эффективности цифровой обработки, выбранного метода и выбора оптимального вейвлет-базиса; 3) оценка искажений и потери информации при цифровой обработке контраста; 4) апробирование методик качественного и количественного анализа для исследования и диагностики веществ различной физико-химической природы и технологических процессов (рассматривается в 3 главе).

Вторая и третья главы содержат основной экспериментальный результат, полученный при выполнении данной диссертационной работы.

Во второй главе рассматриваются различные методики количественной оценки качества топографических и поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллов, снижающие субъективный фактор при визуальном восприятии анализируемого контраста и вероятность ошибок при идентификации дефектов и их локализации в объеме монокристалла. Глава содержит восемь разделов. Раздел 2.1 посвящен моделированию основных зашумляющих факторов топографического и поляризационно-оптического контрастов. Предложенная математическая модель шума выглядит следующим образом:

$$S_2 = S_1 + ((\text{Random}(10)/10) - (5/10)),$$

где S_1 – значения исходного изображения без шума, S_2 – значения исходного изображения с учётом шума, $(\text{Random}(10)/10) - (5/10)$ – функция генерирования шума, в которой $(\text{Random}(10)/10)$ – значение функции генерирования чисел в диапазоне от 0 до 10 поделённое на 10, а $(5/10)$ – слагаемое, позволяющее сместить сгенерированный шум в отрицательную область для его симметричного наложения. Сгенерированный шум со случайным распределением симметрично добавляется к изображению в сторону его затемнения и осветления, т.е. в положительную и в отрицательную области. Подбирая параметры генерирования шума $(\text{Random}(10)/10)$ и слагаемого смещения, можно получить разную степень зашумлённости. Для большего соответствия экспериментальному контрасту полученные изображения подвергались небольшому гаусс-размытию (радиус 1–2 пикселя).

При моделировании теоретического контраста задаются основные параметры дефектов структуры, включая и их расположение в объеме монокристалла. Если смоделировать основные «зашумляющие» факторы – зернистость и фоновую неоднородность изображений, то, варьируя параметрами моделирования, можно получить теоретический контраст, максимально приближенный к экспериментальному. Зная заложенные при моделировании параметры, можно расшифровать экспериментальный контраст и идентифицировать дефект структуры, включая и его расположение в объеме кристалла. Применяв цифровую обработку экспериментального и «подогнанного» под экспериментальный зашумленного теоретического контраста, можно проверить правильность идентификации дефекта структуры. Критерием правильности служат одинаковые по виду обработанные контрасты. Пример изображений:

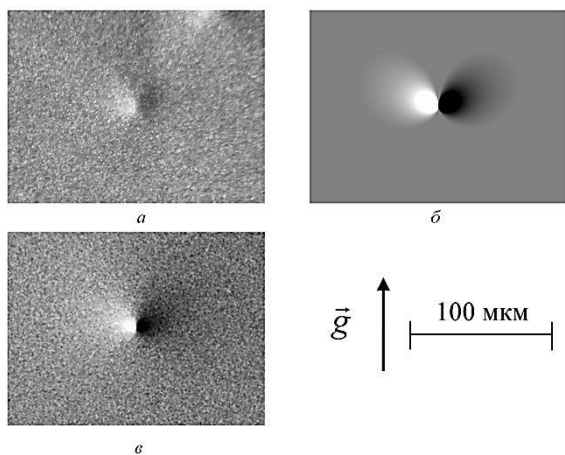


Рис.1. Изображения винтовой дислокации в монокристалле 6H-SiC: экспериментальное топографическое (а), теоретическое (б) и теоретическое с моделированным шумом (в) [1]

экспериментального топографического, теоретического и теоретического с моделированным шумом для винтовой дислокации в монокристалле 6H-SiC представлен на рис. 1. В разделе 2.2 рассмотрены основные проблемы, решаемые введением количественных критериев, при выборе метода цифровой обработки и оценке ее результатов, а также при выборе оптимального вейвлет-базиса. В разделе 2.3 приводится классификация

методик количественной оценки качества изображений и выбор методик для последующего применения: среднее квадратичное отклонение или стандартное отклонение (MSE), пиковое отношение сигнала к шуму (PSNR) и показатель структурного сходства (SSIM). В разделе 2.4 на примере цифровой обработки теоретического зашумленного контраста дефектов структуры монокристалла 6H-SiC различными вейвлетами приводятся результаты оценки качества реставрации с помощью метрик PSNR, MSE и SSIM. Установлено, что по сравнению с PSNR и MSE методика оценки качества изображений по структурной схожести SSIM является более перспективной, так как при расчете учитываются яркостные, контрастные и структурные особенности сравниваемых изображений. В разделе 2.5 предложен и апробирован более простой, экспрессный и легко технически реализуемый подход количественной оценки качества цифровой обработки, основанный на построении для анализируемого контраста яркостных характеристик (ЯХ), профилей интенсивности (ПИ) и разностного контраста (РК). Методика продемонстрирована на примере цифровой обработки теоретического зашумленного контраста краевой (а) и правовинтовой (б) дислокаций, а также когерентного включения типа «вакансия» (в) монокристаллического 6H-SiC вейвлетами Симлета с масштабом функции 8 (sym8) и Мейера (dmeu). При визуальном восприятии обработанных изображений отдать предпочтение одному из вейвлетов

практически невозможно (рис.2). Трудно выявить и искажения контраста, вносимые вейвлет-обработкой: изображения содержат практически все основные особенности, характерные для исходного (незашумленного) теоретического контраста.

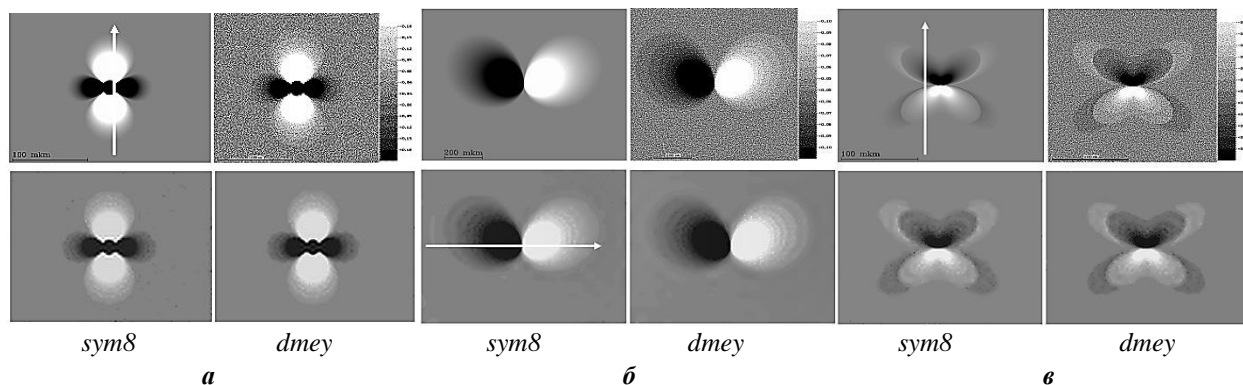


Рис.2. Результат цифровой обработки вейвлетами *sym8* и *dmeu* теоретического контраста с моделированной зернистостью краевой (а), правинтовой (б) дислокаций и когерентного включения типа «вакансия» (в) для монокристалла 6H-SiC [1]

Аналогичный результат получается и при наложении на зашумленный контраст фоновой неоднородности. На рис. 3 в качестве примера приведены снятые в программе «Image-Pro Plus 6.0» ПИ (рис.3а,б,в), представляющие собой изменение интенсивности в направлении

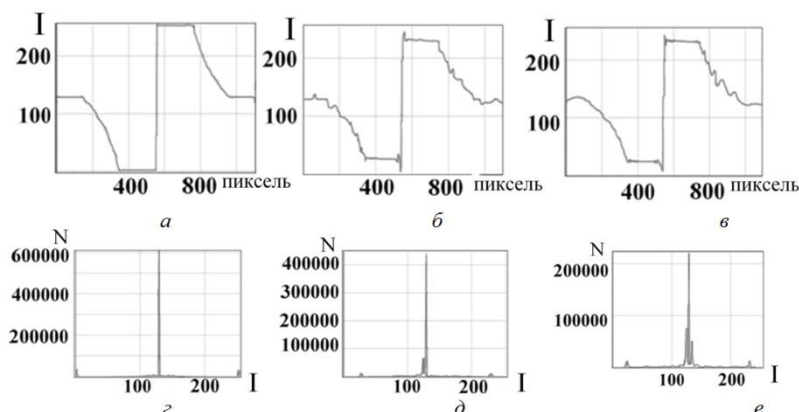


Рис. 3. ПИ (а, б, в) и ЯХ (г, д, е) исходного (а, г) и подвергнутого цифровой обработке вейвлетами *sym8* (б, д) и *dmeu* (в, е) зашумленного теоретического изображения правинтовой дислокации монокристалла 6H-SiC [1, 2]

указанном стрелкой на рис 2,б, и ЯХ (рис.3г,д,е), представляющие собой гистограмму анализируемого изображения: исходного (рис.3а,г) и обработанного вейвлетами *sym8* (рис.3б,д) и *dmeu* (рис.3в,е) теоретического изображения правинтовой дислокации. Для ПИ по оси ординат отложена интенсивность в градациях серого цвета (у 8-битных изображений (0–255)), а по оси абсцисс – расстояние в пикселях. Для ЯХ по оси абсцисс отложена интенсивность (I) в градациях серого цвета (0–255), а по оси ординат – количество пикселей (N), имеющих определенную интенсивность. ПИ исходного и обработанного теоретического контраста практически идентичны, и говорить о преимуществе того или иного вейвлет-базиса трудно, но максимальные значения ЯХ исходного и обработанных теоретических изображений сильно отличаются друг от друга. Значение максимума ЯХ вейвлета *sym8* ближе к исходному контрасту. Чем ближе обработанное различными вейвлет-базисами «зашумленное» изображение к исходному теоретическому, тем выше качество цифровой обработки. Следовательно, вейвлет *sym8* является более оптимальным, а в качестве количественного критерия эффективности цифровой обработки, основанной на дискретном вейвлет-анализе, можно использовать ЯХ.

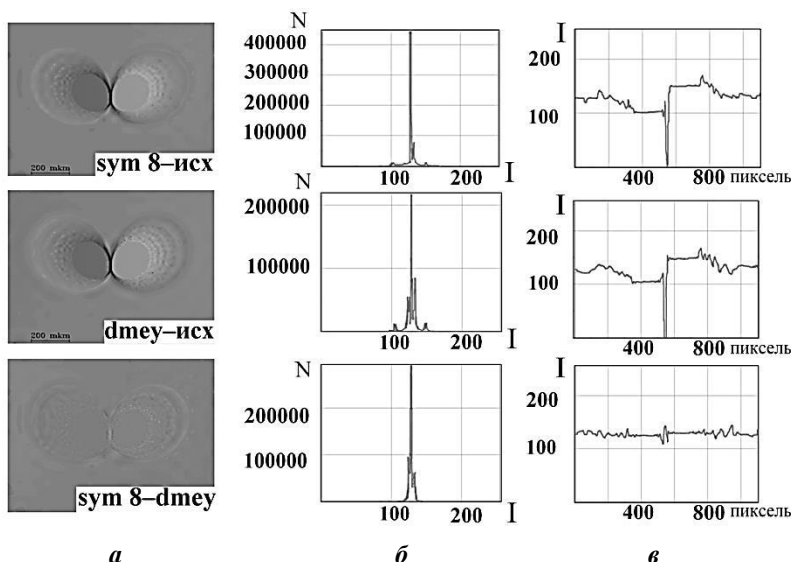


Рис. 4. Разностный контраст между двумя изображениями «sum 8-исходное», «dmeу-исходное» и «sum 8-dmeу» (а), ЯХ (б) и ПИ (в) [1]

исходное» – 400000 и «dmeу-исходное» – 200000. РК для «sum 8-dmeу», несмотря на визуальную схожесть, также не является нулевым. Следовательно, результат цифровой обработ-

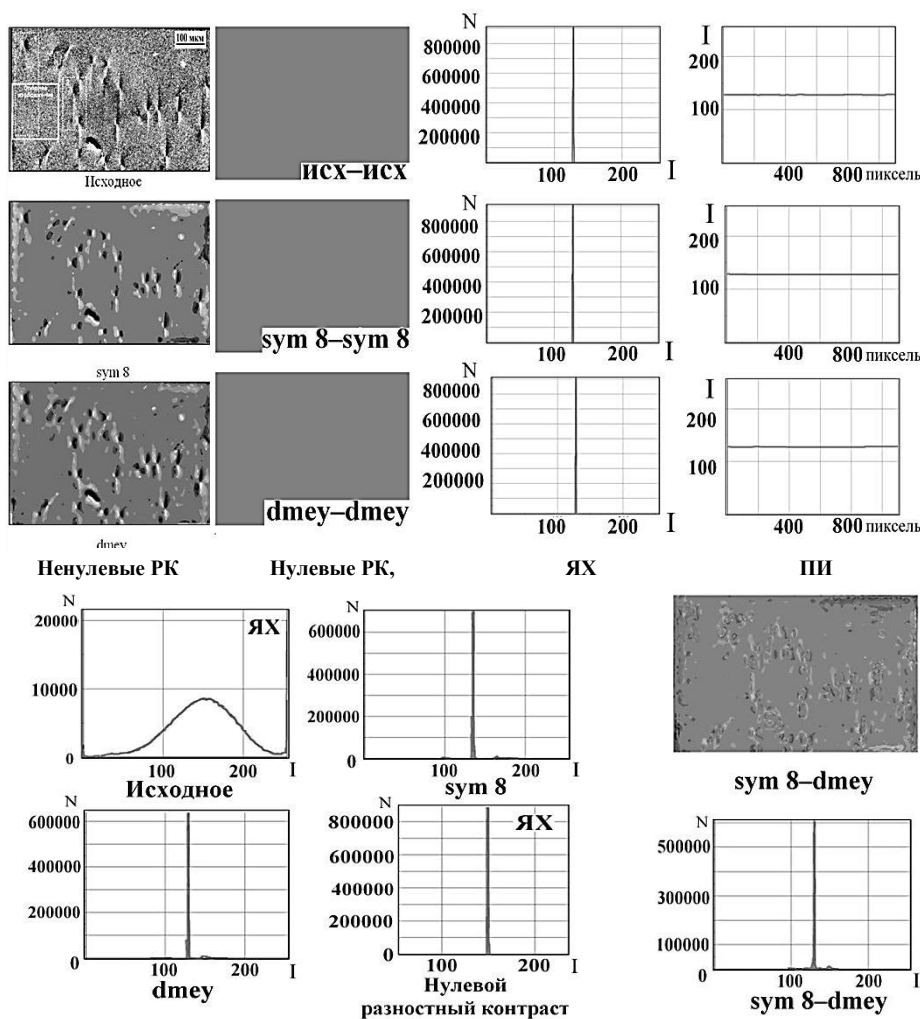


Рис. 5. Результат вейвлет-обработки фрагмента топограммы монокристалла 6H-SiC, содержащего скопление краевых дислокаций, и количественная оценка эффективности различных вейвлет-базисов [1, 2]

Простым критерием оценки качества цифровой обработки является РК между обработанными и исходными изображениями (рис. 4). Если два изображения идеально одинаковые, то РК является нулевым и представляет собой однородный фон. РК для «sum 8-исходное», «dmeу-исходное» и «sum 8-dmeу» не является нулевым. Для ЯХ наблюдается резкое различие, соответственно, для «sum 8-

исходное» – 400000 и «dmeу-исходное» – 200000. РК для «sum 8-dmeу», несмотря на визуальную схожесть, также не является нулевым. Следовательно, результат цифровой обработ-

ки различными вейвлет-базисами различен. И в этом случае наиболее оптимальным является также вейвлет sum 8.

Аналогичный результат был получен для экспериментального контраста монокристалла 6H-SiC, содержащего скопление краевых дислокаций (рис. 5). Максимум ЯХ в случае обработки топограммы вейвлетом sum 8 выше, чем для вейвлет-базиса dmeу, соответственно, 700000 и 640000. РК «sum 8-dmeу» не является нулевым. Следовательно, и для экспери-

ментального контраста мы получили результат, аналогичный тестовым изображениям.

В разделе 2.6 предложен вейвлет-метод устранения фоновой неоднородности экспериментального контраста, отличающийся от предложенного ранее большим быстродействием и отсутствием явления элайзинга (флуктуаций интенсивности). Время цифровой обработки – 8–10 с, что в 10–12 раз меньше, чем по ранее предложенному методу, в основе которого лежало обнуление при декомпозиции масштабных коэффициентов. Предлагаемый метод основан на выделении при дискретном вейвлет-анализе фоновой неоднородности и её вычитании из исходного контраста, рис. 6 (первый метод). Обработка включает четыре этапа: 1 этап – обнуление всех детальных коэффициентов и выделение только фоновой неоднородности; 2 этап – построение РК между исходным контрастом и полученным на первом этапе; 3 этап – гаусс-размытие РК, подбираемое экспериментально; 4 этап – построение результирующего РК между размытым на 3 этапе и РК, полученным на 2 этапе. Для лучшего визуального восприятия полученного контраста проводится коррекция динамического диапазона. В этом же разделе сравнивается эффективность первого метода с методом, основанным на гаусс-размытии исходного изображения до потери деталей, относящихся к дефектам структуры, и его вычитании из исходного с коррекцией динамического диапазона, рис. 6 (второй метод). Визуально контрасты, представленные на рис. 6,б, мало отличаются друг от друга, но если построить разностный контраст, то легко выявляется отличие между ними.

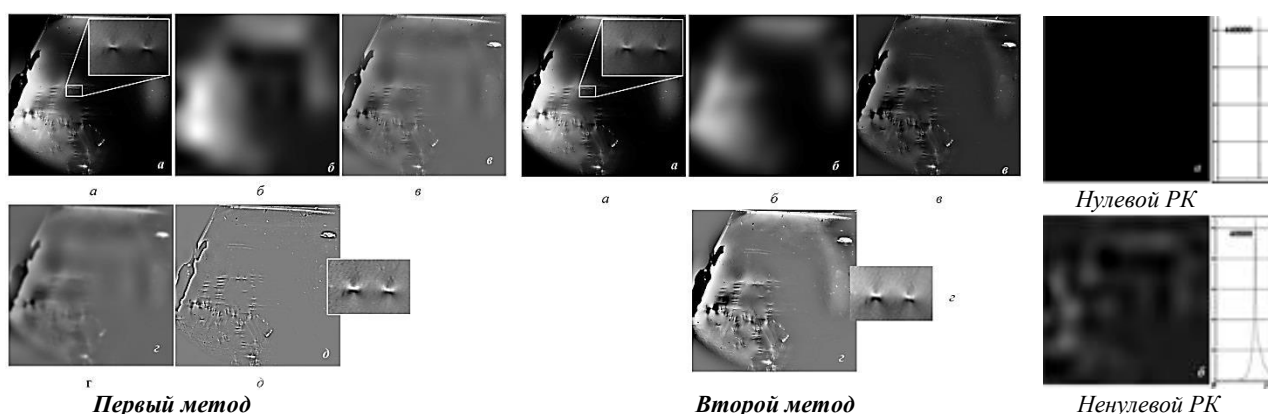


Рис. 6. Устранение фоновой неоднородности поляризационно-оптического контраста монокристалла 6H-SiC различными цифровыми методами [1, 2]

В разделе 2.7 дана количественная оценка эффективности цифровой обработки HDR-изображений монокристалла 6H-SiC, сохраняемых для последующей вейвлет обработки в 8-битном и 16-битном форматах. Изображения визуально практически неразличимы. Построив РК между исходными изображениями, получаем не нулевой РК: ПИ имеют сильную флуктуацию интенсивности, а ЯХ колоколовидную форму (рис. 7).

В разделе 2.8 сделан вывод о целесообразности применения на практике методики количественной оценки качества топографических и поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллов, основанной на построении ЯХ, ПИ и РК, что позволяет уменьшить субъективный фактор при визуальном анализе контраста, формируемого дефек-

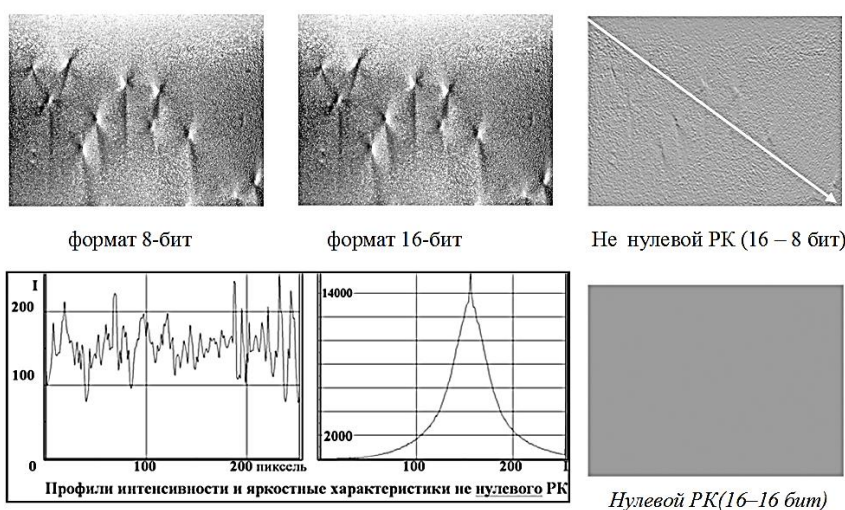


Рис. 7. HDR-изображения монокристалла 6H-SiC, представленные в различных форматах, их РК, ПИ и ЯХ. Стрелкой показано направление съятия ПИ [1, 2]

выбраны сложные для цифровой диагностики мясное сырье и продукция из него, питьевая и промышленная вода, пиво и процесс его старения, вино и различные виды посола мяса многокомпонентной смесью. Основная задача, решаемая в данной главе, сводилась к созданию цифровых методик экспресс-диагностики качества исследуемых объектов, позволяющих свести к минимуму субъективный фактор их оценки, к введению простых и надежных количественных критериев оценки качества, с использованием подходов и критериев, рассмотренных во второй главе. Все методики апробированы в условиях массового производства продукции. В разделе 3.1 кратко описаны основные методы исследования и контроля качества, применяемые предприятиями пищевой промышленности, и обосновывается перспективность применения в качестве основного параметра цвета и его изменений для исследуемых объектов. Последовательность цифровой обработки представлена на рис. 8.



Рис. 8. Последовательность цифровой обработки исследуемых объектов [3]

тами структуры, надежно их идентифицировать и локализовать в объеме монокристалла.

В третьей главе рассматриваются цифровые методики, основанные на регистрации цветовых характеристик и их изменений при различных внешних воздействиях

для веществ различной физико-химической природы.

Объектами исследования

В разделе 3.2 приводятся экспериментальные результаты компьютерной диагностики качества мясного сырья разных поставщиков и регионов. Визуально определить различие цвета мяса разных производителей и различных частей туши часто не представлялось возможным. Качественные и количественные

отличия между образцами надежно фиксируются по РК, ПИ и ЯХ. Наиболее удобными для количественного анализа являются ЯХ и РК. Уменьшение флуктуации интенсивности, обусловленной влиянием границ между волокнами мышечной ткани, устранялось гаусс-размытием изображений исследуемых образцов (радиус размытия 5–20 пикселей).

Нарушение условий хранения и транспортировки, неоднократная заморозка мясного сырья приводят к существенному снижению его качества и качества изготовленных из него мясных продуктов. На рис. 9 в качестве примера представлен образец говядины, взятый из наружной части тазобедренного отруба туши, который был подвергнут заморозке при температуре минус 18 °С и последующей разморозке при $t=14\div 16$ °С. Невидимые изначально человеческим глазом изменения цвета, произошедшие в мясе, надёжно зафиксировались при цифровой обработке изображений. Заморозка и последующая разморозка мясного сырья приводят к изменениям его яркостных характеристик, т.е. цвета.

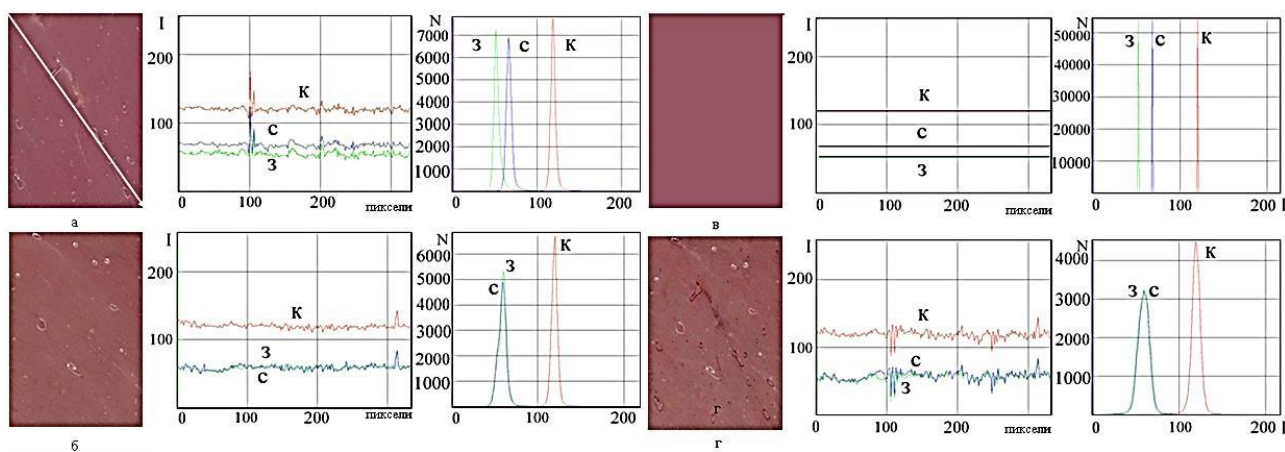


Рис. 9. Изображения, ПИ и ЯХ говядины наружной части тазобедренного отруба: а – охлаждённый свежий образец; б – после заморозки при температуре минус 18 °С и последующей разморозке ($t = 14\div 16$ °С); в – нулевой РК (а–а); г – РК, полученный вычитанием изображений б и а. К, З и С – красная, зеленая и синяя компоненты цвета соответственно [3]

В разделе 3.3 представлены экспериментальные результаты компьютерной диагностики колбасы разного вида и разных производителей. Невидимое визуально отличие колбас по цвету надежно регистрируется по ЯХ и РК. Высокая чувствительность методик позволила проследить изменение цвета в зависимости от температуры, условий хранения, рецептуры и производителя. Пример диагностики колбасы варёной «Докторская» представлен на рис. 10. Сканирование проводилось через каждые 3 часа при $t = 14\div 16$ °С и влажности воздуха 85 %.

Отличия в контрасте для человеческого глаза не заметны, однако ЯХ имеют значительные количественные отличия, а РК даёт качественную оценку произошедших изменений: с течением времени уменьшается количество точек, имеющих максимальные значения интенсивности (отложено по оси ординат), но сама интенсивность в градациях серого цвета изменяется незначительно (отложена по оси абсцисс).

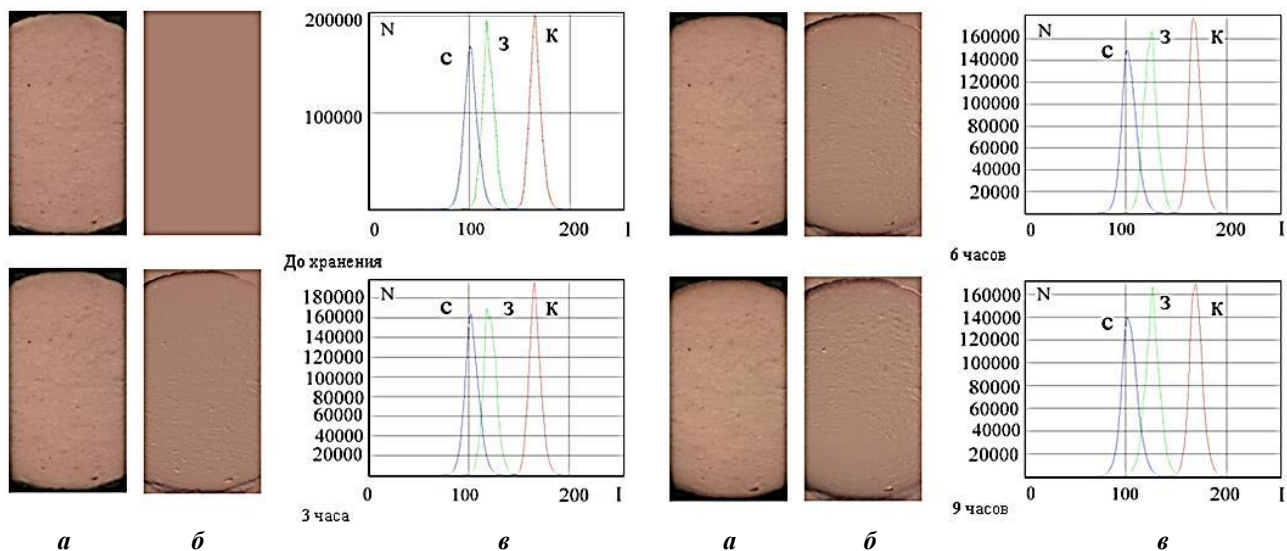


Рис. 10. Результат цифровой обработки изображений колбасы варёной «Докторская» производителя А: а – исходные, б – РК, полученный путём вычитания изображений после хранения и исходного; в – ЯХ [3]

Раздел 3.4 посвящен компьютерной диагностике сухого и мокрого способов посола мяса цыплят-бройлера многокомпонентной смесью соль-перец-чеснок в соотношении 1:0,11:1. При мокром способе концентрация соли в рассоле составляла 12 %. Для каждого эксперимента отбирались пять кусков мяса размером 5×7 см и толщиной ~2 см, которые укладывали в стеклянные контейнеры. Один кусок мяса обсыпали по всему периметру посолочной смесью, три других – компонентами смеси (отдельно солью, перцем и чесноком). Пятый кусок мяса был контрольным, и по нему оценивалось изменение цвета мяса в процессе эксперимента. Контейнеры с мясом сверху закрывались стеклом. При всех способах посола пропитка мяса проходила только со стороны боковой поверхности, хотя в реальных условиях процесс посола идёт через всю поверхность. Сканирование мяса в течение первого часа проводили через каждые 15 мин, далее – через каждые 30 мин. В промежутках между сканированием мясо находилось в холодильнике при температуре 4–6 °С.

При посоле происходит изменение цвета мяса, фиксация которого человеческим глазом особенно на начальном этапе затруднена. Цифровые методики выявляют незначительные изменения цвета, определяют границу между пропитанными и непропитанными областями, а, следовательно, позволяют оценить по профилям интенсивности (ПИ) и областям равного контраста (ОРК) глубину и скорости проникновения смеси и ее компонентов в мясо.

Разработаны и апробированы три цифровые методики (четвертая – комбинированная).

1. **Методика, основанная на анализе областей равного контраста и профилей интенсивности.** Скорости процесса посола мяса смесью и её отдельными компонентами по различным направлениям отличны друг от друга, поэтому экспериментальный контраст должен отражать эти обстоятельства. На рис. 11 представлена предполагаемая модель визуализации процесса посола и определение его количественных характеристик. Арабскими цифрами показаны четыре направления, по которым снимались ПИ. В идеальном случае ПИ имеют вид, представленный на рис. 11, в: 1 – исходный, 2–4 – для различного времени посола t , причём $t_1 < t_2 < t_3$ и $l_1 < l_2 < l_3$, где l – глубина посола. Увеличение времени посола приводит к

изменению контраста и ПИ. Сопоставляя изображения ОРК, полученные для разных уровней гаусс-размытия (применяется для уменьшения влияние границ волокон мышечной ткани), с построенными ПИ и, зная размеры образца мяса, удаётся достаточно надёжно определить глубину проникновения посолочной смеси, а также оценить глубину проникновения каждого её компонента в отдельности. Зная время посола и глубину проникновения легко оценить скорость процесса: $v = l_n / t_n$.

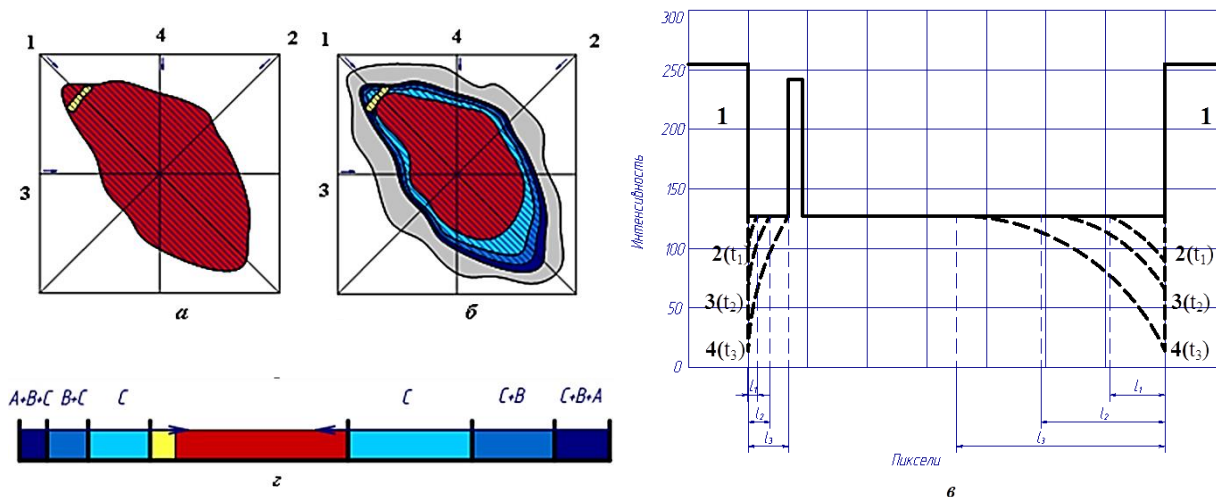


Рис.11. Схема визуализации процесса посола мяса смесью, состоящей из трех компонент *A*, *B* и *C*: *a* – исходное просканированное изображение, римскими цифрами показаны направления снятия профилей интенсивности; *б* – после посола в течение некоторого времени; *в* – профили интенсивности (1 – исходный, 2–4 – после посола в течение времени $t_1 < t_2 < t_3$, l_1, l_2, l_3 – глубина посола); *г* – изменение контраста мяса при посоле при пяти градациях цвета [3]

Суть предлагаемой модели изменения экспериментального контраста. При построении ОРК необходимо выбрать оптимальное число градаций цвета. До посола анализируемый контраст обусловлен в основном мясом и соединительной тканью, т.е. имеем две градации цвета. В процессе посола добавляется контраст, создаваемый компонентами посолочной смеси, условно, *A*, *B* и *C*, т.е. имеем пять градаций цвета, рис. 11, *г*. В первой области присутствуют компоненты *A*, *B* и *C*, во второй – *B* и *C*, а в третьей – только компонента *C*. Четвёртая и пятая области соответствуют соединительной ткани (желтая область) и мясу (красная область). Линии, разделяющие эти области, можно связать с глубиной проникновения смеси и её компонентов. Увеличение числа градаций цвета позволяет более детально оценить изменение контраста в каждой области. На рис. 12 представлен пример цифровой обработки по **первой методике** для соли. В общем случае по изменению контраста и по снятым ПИ можно судить об изменении концентрации смеси и её компонентов по глубине, определить скорости их проникновения по интересующим исследователя направлениям.

2. Вторая методика основана на разложении изображения по цветовым каналам (красный, зелёный, синий), построении ОРК и ПИ. При посоле наибольшие изменения цветовых характеристик могут происходить в одном из каналов RGB-изображения (рис. 13). На практике можно проводить обработку не всего изображения, а наиболее интересной для диагностики области.

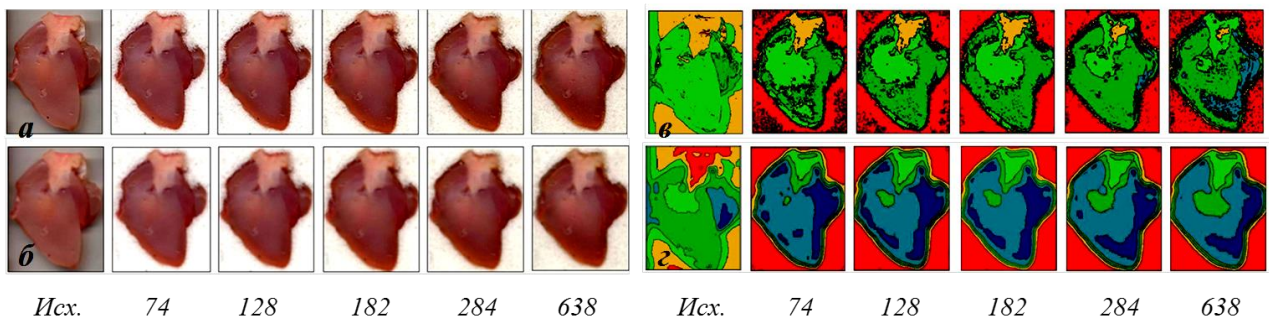


Рис. 12. Сухой способ посола мяса цыплёнка-бройлера солью. Сканирование в автоматическом режиме с разрешением 600 dpi: а – исходные изображения; б – после гаусс-размытия, радиус размытия 10 пикселей; при 5 градациях цвета: в и г – для не размытых и размытых изображений, соответственно. Цифрами указана продолжительность посола в минутах

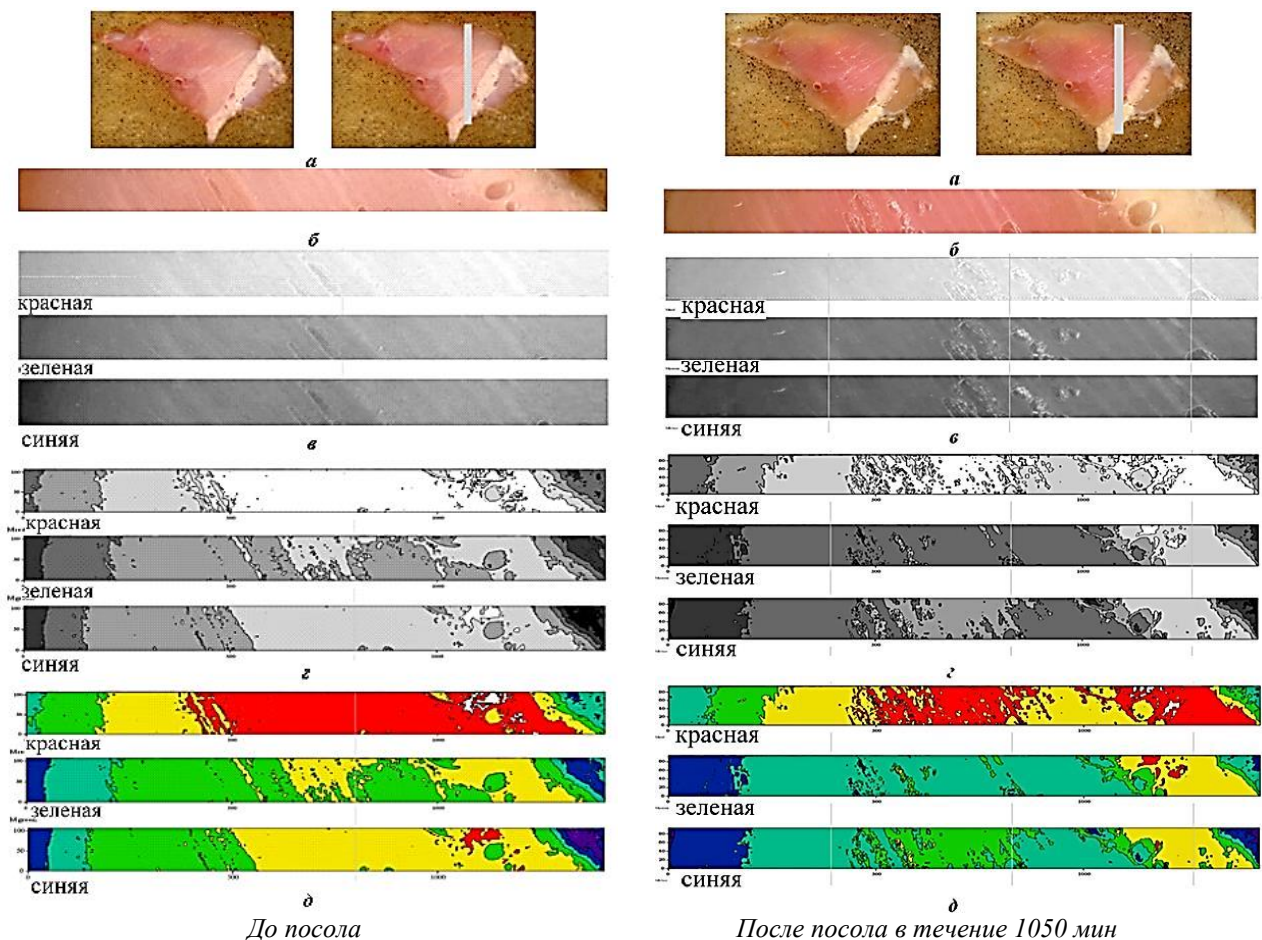


Рис. 13. Разложение изображения по цветовым каналам (компонентам): а – исходное и после мокрого посола в течение 1050 мин.; б – вырезанная полоска; в – разложение цветного изображения по каналам и представление их в градациях серого цвета от 0 до 255; г и д – области равного контраста в чёрно-белом и цветном вариантах при 5 градациях цвета[3]

3. Третья методика основана на регистрации разностного контраста. Данная методика цифровой обработки обладает большей наглядностью. Она основана на анализе РК, полученного вычитанием двух изображений, например, исходного и после посола. Если изменений цвета мяса нет, то имеем нулевой РК, а ПИ представляют собой прямую линию (рис. 14, профиль 1). При посоле концентрация компонентов смеси убывает по мере удаления от поверхности вглубь мяса. Построенный РК отражает это обстоятельство изменением

цвета и ПИ (профили 2–6). Количественные характеристики процесса посола определяются

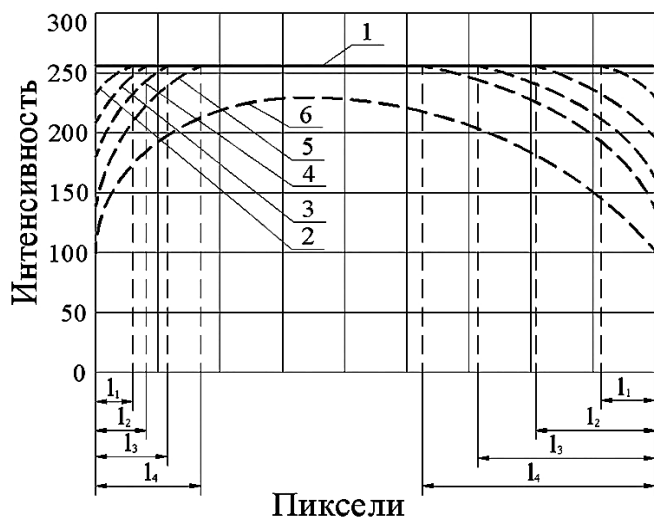


Рис. 14. ПИ и их изменение при посоле, регистрируемое по третьей методике: 1 – при нулевом разностном контрасте (интенсивность равна 255); 2–6 – после посола в течение времени $t_1 < t_2 < t_3 < t_4 < t_5 < t_6$, $l_1 - l_4$ – глубина посола (модельное представление) [3]

по построенным ОРК и ПИ. Для уменьшения влияния на РК, ОРК и ПИ границ между волокнами мышечной ткани применяется гаусс-размытие. По данной методике можно последовательно записать РК между исходным изображением и изображениями мяса при различных временах посола. По изменению РК можно судить о динамике процесса посола, оценивать изменение цветовых характеристик и определять количественные характеристики за какой-то выбранный отрезок времени. Пример цифровой обработки по третьей методике представлен на рис. 15.

В результате проведенных исследований удалось провести визуализацию процесса посола, определить глубину проникновения посолочной смеси и каждой отдельной ее компоненты в мясо, а так же вычислить скорость процесса для разных видов посола (табл.1).

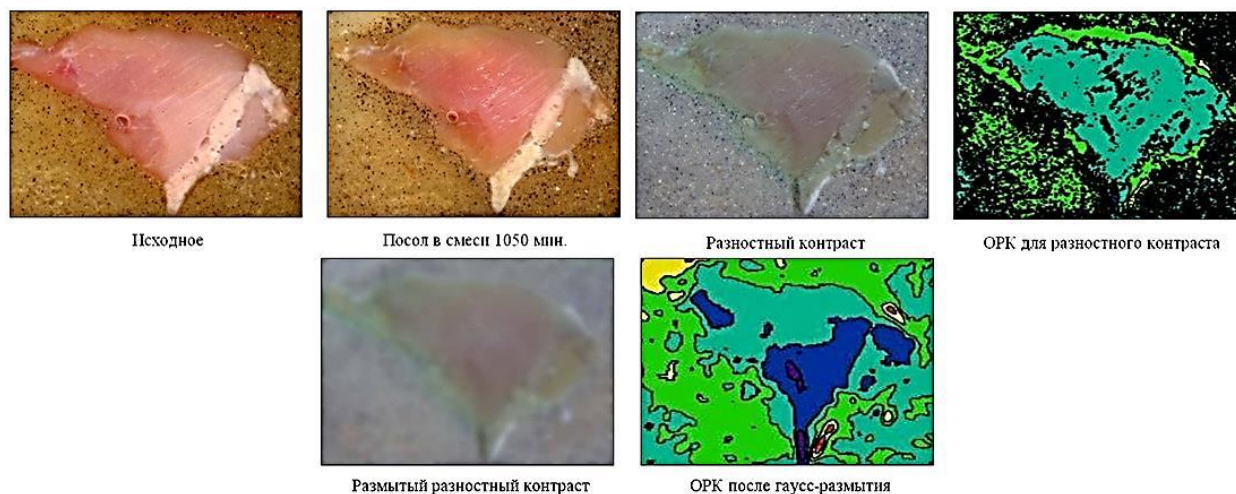


Рис. 15. Цифровая обработка изображения мяса цыпленка-бройлера по методике, основанной на анализе разностного экспериментального контраста, полученного вычитанием двух изображений – исходного и после посола. Радиус размытия 10 пикселей. ОРК построены для 5 градаций цвета

Таблица 1

Скорость посола для различных компонент смеси, полученная из анализа областей РК и ПИ, выраженная в см/час [3]

Способ посола	Сухой		Мокрый	
	вдоль волокон	перпендикулярно волокнам	вдоль волокон	перпендикулярно волокнам
Соль	8–13	6–11	5–9	4–6
Перец	0,02–0,035	0,015–0,025	0,1–0,18	0,06–0,08
Чеснок	0,06–0,11	0,04–0,09	0,18–0,35	0,11–0,23

В разделе 3.5 представлены экспериментальные результаты исследования пива разных производителей и показана возможность эффективного применения компьютерных технологий для экспресс-диагностики его качества по цветовым характеристикам (РК, ПИ и ЯХ), регистрации частиц различной физико-химической природы без применения специальных красителей и исследования процесса старения пива.

Раздел 3.6. посвящен компьютерной экспресс-диагностике качества воды, основанной на построении РК, ЯХ и ПИ, а именно: дистиллированной воды; воды рек, каналов и заливов озера Ильмень; воды, поступающей из реки Волхов на левобережные водоочистные сооружения (ЛВСО) Великого Новгорода; воды, подаваемой после многоступенчатой очистки в городскую сеть водоснабжения и отвечающей требованиям СанПиН для питьевой воды. Для демонстрации возможностей методик диагностики качества воды ниже приводиться лишь часть экспериментальных результатов (рис. 16 и рис. 17).

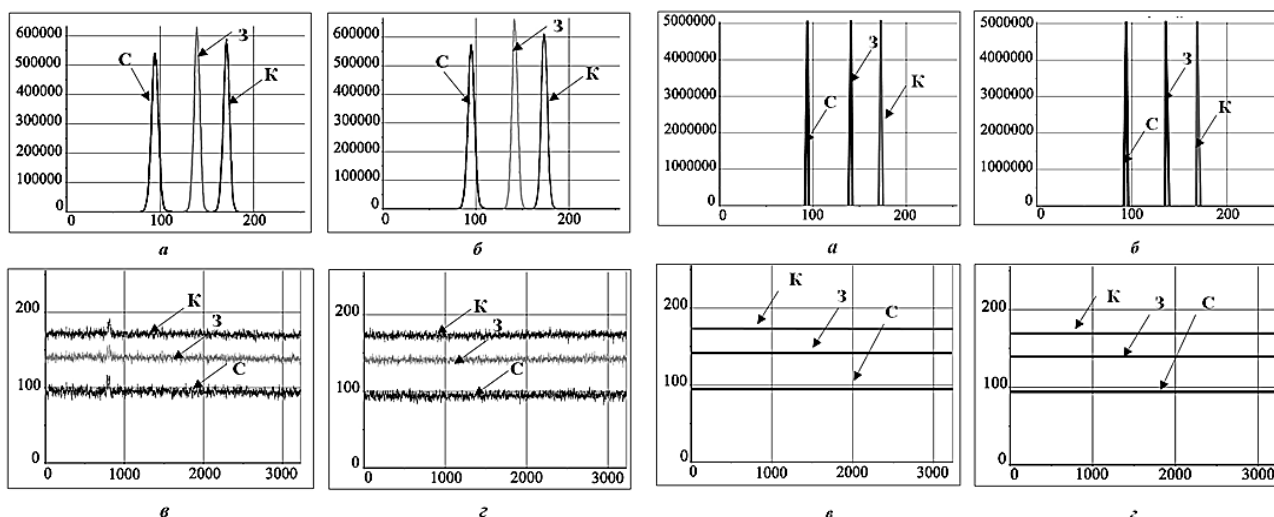


Рис. 16. Результат цифровой обработки изображений одной из проб речной воды до (а, в) и после очистки (б, г): а, б – яркостные характеристики, в, г – профили интенсивности; С, З и К – синий, зелёный и красный цветовые каналы

Рис. 17. Результат цифровой обработки для нулевых РК проб речной воды (рис. 16) до (а, в) и после очистки (б, г): а, б – яркостные характеристики, в, г – профили интенсивности

Оцифровка изображений проводилась цифровым аппаратом, установленным при помощи оптической насадки со встроенным дополнительным объективом на микроскоп. Съёмка воды проводится при одних и тех же условиях и установках цифрового аппарата: освещении, разрешении, выдержке, расстояния до объекта. Питание микроскопа осуществлялось через стабилизированные источники. Под объектив микроскопа помещалась подготовленная пустая кювета и проводилась её съёмка без воды. Далее на центральную область стекла кюветы с помощью шприца наносилось строго определенное количество воды (1 мл) и снова проводилась съёмка. Экспериментальный РК получали путём вычитания изображения пустой кюветы из изображения кюветы с водой или изображений двух сравниваемых проб.

Изображения исходных проб воды по цвету визуально друг от друга практически ничем не отличались, но, вычитанием изображения очищенной воды из изображения речной воды,

получали ненулевой РК, яркостные характеристики и профили интенсивности которого не имели вид прямых. Максимальные значения ЯХ для речной воды, взятой в разные дни и сезоны, имели заметный разброс от пробы к пробе для всех трёх цветовых каналов, что подтвердилось результатами физико-химического анализа отобранных проб речной воды по гос-тированным методикам, представленным в таблице 2. Выявлена четкая связь между физико-химическими параметрами воды (цветность, мутность, рН и щёлочность) и её цветовыми характеристиками. Эти параметры сильно изменялись и для проб воды, взятой в разных местах реки Волхов, озера Ильмень и рек, в него втекающих.

Таблица 2

Физико-химические показатели проб воды [3]

Дата	Мутность, мг/л		Цветность, град		рН		Щёлочность	
Норма по СанПиН	1,5		20		6,0-9,0		1,10	
Проба воды	речная	очищенная	речная	очищенная	речная	очищенная	речная	очищенная
17.10.2011	6	0,45	77	11	7,54	6,35	1,4	0,46
25.10.2011	23,8	0,24	70	10	7,36	6,25	1,45	0,48
02.11.2011	6,1	0,7	105	10	7,5	6,45	1,4	0,65
13.11.2011	7,2	0,95	117	7	7,15	6,15	1,15	0,31

Для оценки экспериментальной погрешности определения характеристик изображений один и тот же образец оцифровывался несколько раз, для каждого изображения строились ЯХ и определялись значения X и Y: X – интенсивность в градациях серого цвета (0–255), соответствующая максимальному значению, Y – числу точек, имеющих данное значение интенсивности в градациях серого цвета. Погрешность измерений не превышала

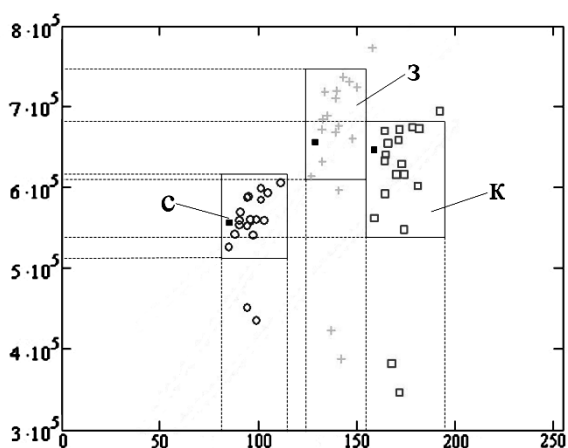


Рис. 18. Области максимальных значений ЯХ для очищенной воды, соответствующей нормам СанПиН: С, З и К – синий, зелёный и красный каналы. Чёрные точки соответствуют диагностике воды, взятой на одном из пищевых предприятий [3]

1–2 %, и обусловлена в основном изменением освещённости пробы воды при её оцифровке.

На рис. 18 нанесены точки, соответствующие максимальным значениям ЯХ для всех цветовых каналов изображений очищенной воды и также выделены области, соответствующие требованиям СанПиН [2]. Максимальные значения ЯХ, не попадающие в выделенные области, не удовлетворяют по каким-либо параметрам и характеристикам этим требованиям. Такая вода требует дополнительного контроля. В таблице 3 представлены результаты расчёта коэффициентов корреляции между выбранными физико-химическими показателями воды (цвет-

ность, мутность, рН и щёлочность) и максимальными значениями ЯХ для трёх цветовых каналов (синего, зелёного и красного).

Коэффициенты корреляции между физико-химическими показателями воды и яркостными характеристиками оцифрованных изображений [3]

Показатель	Коэффициент корреляции					
	Синий канал		Зелёный канал		Красный канал	
	X	Y	X	Y	X	Y
Цветность	-0,496	-0,234	0,583	0,989	0,882	-0,509
Мутность	-0,378	0,989	-0,505	0,012	-0,455	0,967
pH	-0,755	-0,179	-0,222	0,961	-0,452	0,080
Щёлочность	-0,790	-0,317	0,105	0,969	0,908	0,141

Цветность воды наиболее сильно коррелирует со значениями ЯХ для зелёного цветового канала по Y и красного канала по X, причём зависимость является прямой, т. е. с увеличением цветности воды возрастают и указанные максимальные значения ЯХ для зелёного и красного каналов. Мутность воды имеет наибольшую и прямую корреляцию со значениями ЯХ для синего и красного каналов по Y. Показатель pH воды наиболее сильно коррелирует со значениями ЯХ для зелёного канала по Y, а щёлочность – со значениями для зелёного канала по Y и красного по X.

На рис. 19 представлены результаты исследования воды озера Ильмень и впадающих в него рек и каналов. Результаты диагностики по ЯХ полностью совпадали с результатами физико-химического анализа, проведенного по гостированным методикам. Таким образом, установлено, что физико-химические показатели качества воды имеют хорошую корреляцию с максимальными значениями ЯХ для каждого из трёх цветовых каналов, а выбор критерием оценки качества воды ЯХ является обоснованным и объективным.

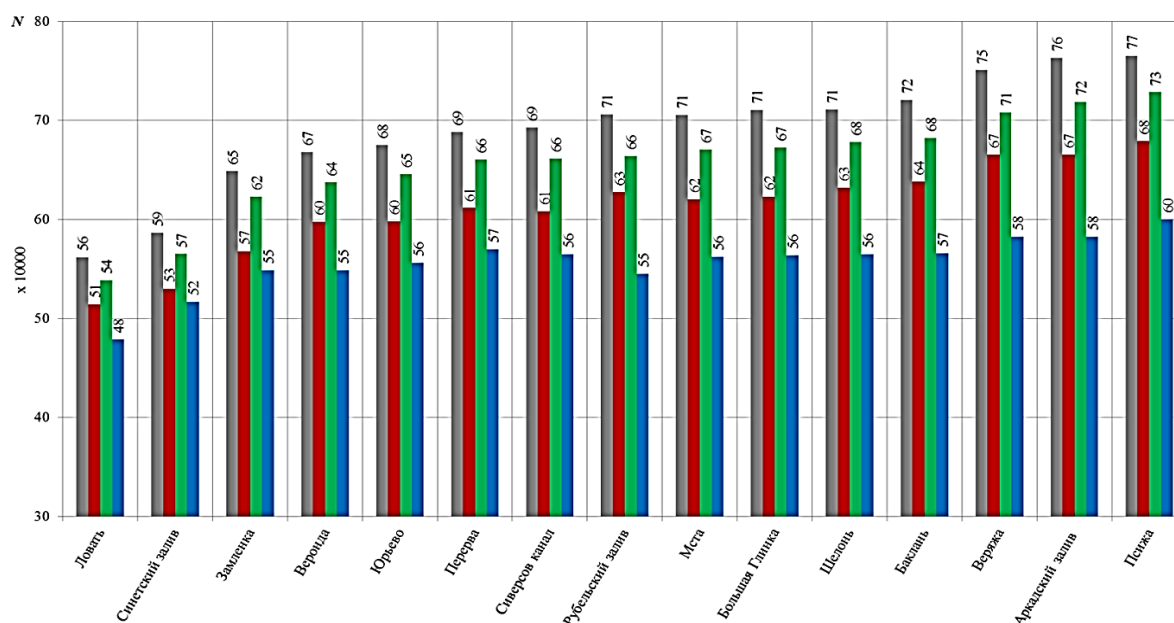


Рис. 19. Средние значений количества пикселей соответствующих пиковым значениям интенсивностей ЯХ РК изображений проб воды водоемов озера Ильмень по трем цветовым каналам (красный, зелёный, синий) и в градациях серого цвета

В разделе 3.7 представлены результаты компьютерной диагностики качества и выявления фальсифицированной винной продукции. Помимо вкуса цвет и интенсивность окраски

относятся к важнейшим показателям качества красных вин. Разнообразие сортов виноградного вина и приемов его производства обуславливает многочисленные возможности для фальсификации этого продукта. В работе рассмотрено три вида фальсификации:

- 1) разбавление или галлизация – способ, при котором кислые, плохие вина «улучшают» добавлением воды с последующим доведением крепости и кислотности до требуемых норм;
- 2) добавление избытка сульфита для увеличения срока сохранности продукции;
- 3) использование некачественного вина, подвергнувшегося избыточному нагреву (в процессе хранения и транспортировки).

В качестве примера эффективности цифровых методик ниже представлены экспериментальные результаты исследования для двух видов красного вина:– Каберне (виноградное, натуральное, красное полусладкое с содержанием сахара 30–50 г/дм³ и алк. 9–11% об., производство Молдавии);– Изабелла (красное, полусладкое «Русская лоза» с содержанием сахара 30–40г/дм., алк. 10–12% об., производство России, Краснодарский край).

Эксперименты проводились следующим образом. Вино в количестве 50–100 мл наливалось в стеклянную кювету, установленную на планшетный сканер, проводилось сканирование в ручном режиме при разрешении 600 dpi. Рядом с кюветами помещался стандарт оптической плотности, имеющий участки с разным, но заранее известным поглощением. Из оцифрованного изображения вырезался квадрат 100×100 пикселей (0,4 × 0,4 см) и с помощью программы «Image-Pro Plus» определялось количество пикселей и интенсивность каждой из трех составляющих цветного изображения: красной, синей и зеленой.

Влияние галлизации на цветность вина. Разбавление вина производили дистиллированной водой (5 %, 10 %, 15 % и 30 %). Результаты исследований разбавления вина Каберне отражены на рис. 20 (кривая 1).

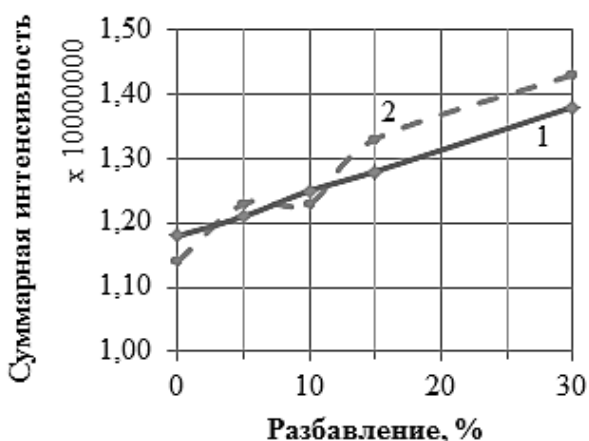


Рис. 20. Изменение интенсивности вина Каберне: при разбавлении дистиллированной водой (1); при разбавлении с восстановлением крепости и сахаристости (2)

По интенсивности красной компоненты можно оценивать уровень разбавления. С увеличением разбавления интенсивность окраски увеличивается. Для проверки полученных результатов было проведено разбавление вина с добавлением сахара и спирта. Результаты исследований для вина Каберне представлено на рис. 20 (кривая 2). Сравнение кривых рис. 20 показывает, что варьирование содержания спирта и сахара в пределах 30% не оказывает заметного влияния на цветность вина.

Влияние избыточного сульфита на цветность и сохранность окраски вина. Сульфитация снижает интенсивность окислительно-восстановительных процессов в продуктах переработки винограда. Умеренное поступление кислорода (10–20 мг/дм³) является нормаль-

ным для здорового винограда и обеспечивает при прочих равных условиях получение чистых здоровых вин. Избыточное (30–40 мг/дм³ и более) поступление кислорода приводит к получению окисленных вин с обедненным сортовым ароматом, простым выветренным ароматом и вкусом. Чрезмерное окисление наносит наибольший вред аромату и цвету будущего вина. Для эксперимента было взято два образца вина по 100 мл. Второй образец содержал 0,06 г сульфита натрия, что соответствует максимально допустимому содержанию сульфита



Рис. 21. Изменение интенсивности красной компоненты при добавлении сульфита в вино Каберне: 1 – исходный образец; 2 – образец с сульфитом

в вине. Образцы хранились при доступе кислорода. Данные пробы сканировались каждые сутки. Результаты исследования представлены на рис. 21. Анализируя полученные результаты можно заключить, что добавление сульфита натрия значительно увеличивает яркость в среднем на 30%, но не защищает от исчезновения цвета.

Раздел 3.8. содержит выводы

по главе и перспективы применения цифровых методик для диагностики качества различных по физико-химическим свойствам веществ и контроля технологических процессов, основанных на анализе цветовых характеристик и регистрации их изменений.

ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Показана перспективность применения цифровых экспресс-методик, основанных на регистрации цветовых характеристик и их изменений, для количественной и качественной диагностики веществ различной физико-химической природы, а цифрового метода, основанного на дискретном вейвлет-анализе, и методики количественной оценки качества экспериментального контраста для диагностики структурного совершенства монокристаллов.

Основными результатами данного диссертационного исследования является:

- создание экспресс-методики устранения фоновой неоднородности и явления элайзинга, основанной на дискретном вейвлет-анализе, уменьшающей в 10–12 раз время цифровой обработки топографического и поляризационно-оптического контраста;

- создание простой методики количественной оценки качества цифровой обработки, выбора оптимального вейвлет-базиса и метода цифровой обработки, основанной на построении яркостных характеристик и разностного контраста, что уменьшило субъективный фактор, вызванный визуальным восприятием анализируемого контраста, и повысило надежность расшифровки и идентификации дефектов структуры монокристаллов, информативность и экспрессность методов РТБ и фотоупругости;

– создание простых цифровых экспресс-методик оценки качества мясного сырья и мясных продуктов, воды, пива, вина, основанных на регистрации их цвета и визуальном изменении под действием различных внешних факторов, в основе которых лежит построение разностного контраста, областей равного контраста, яркостных характеристик и профилей интенсивности, разложение оцифрованного изображения по цветовым каналам;

– создание простых экспресс-методик визуализации процесса посола мяса многокомпонентными смесями, позволяющих определять скорости процесса посола и глубины проникновения смеси и отдельно ее компонент, основанных на регистрации изменений цвета;

– создание простых экспресс-методик исследования процесса старения пива и регистрации в нем частиц различной физико-химической природы без применения красителей, оценки качества питьевой воды и ее соответствия нормам СанПиН, а также выявления фальсифицированной винной продукции.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии:

1. Ткаль В.А., Окунев А.О., Жуковская И.А. Яркостный и частотный анализ изображений дефектов структуры. LAP LAMBERT Academic Publishing Germany. 2012, 385 с. ISBN 978-3-8465-8855-0
2. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Компьютерная диагностика качества. LAP LAMBERT Academic Publishing Germany. 2012, 385 с. ISBN 978-3-359-22771-4

Статьи и расширенные тезисы докладов:

1. Ткаль В.А., Жуковская И.А. Цифровые методы повышения качества экспериментального контраста дефектов структуры монокристаллов. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. № 4. С. 28–37.
2. Жуковская И.А., Шараева А.В., Иванова Т.Д., Мягкова Ю.А. Ткаль В.А., Экспресс-диагностика оценки качества и выявление фальсифицированной продукции. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов (принято в печать в 2014 году).
3. Ткаль В.А., Петров М.Н., Лукин К.Г., Жуковская И.А. Количественная оценка оптимальности выбора вейвлет-функции при цифровой обработке изображений дефектов структуры монокристаллов. Сборник материалов Пятого международного научного семинара 12–16 сентября 2011 года «Современные методы анализа дифракционных данных (топография, дифрактометрия, электронная микроскопия)», Великий Новгород, с. 175–178.
4. Ткаль В.А., Петров М.Н., Лукин К.Г., Жуковская И.А. Методики оценки качества реставрации изображений дефектов структуры монокристаллов. Сборник материалов Пятого международного научного семинара 12–16 сентября 2011 года «Современные методы анализа дифракционных данных (топография, дифрактометрия, электронная микроскопия)», Великий Новгород, с. 179–181.
5. Ткаль В.А., Данильчук Л.Н., Петров М.Н., Жуковская И.А. Количественная оценка и срав-

нительный анализ эффективности методик цифровой обработки изображений дефектов структуры монокристаллов. Сборник материалов Пятого международного научного семинара 12–16 сентября 2011 года «Современные методы анализа дифракционных данных (топография, дифрактометрия, электронная микроскопия)», Великий Новгород, с. 182–185.

6. Ткаль В.А., Петров М.Н., Лукин К.Г., Жуковская И.А. Сравнение эффективности различных методик цифровой обработки изображений дефектов структуры монокристаллов. Сборник материалов Третьей международной молодежной научной школы-семинара 12–16 сентября 2011 года «Современные методы анализа дифракционных данных (дифракционные методы для нанотехнологии)», Великий Новгород, с. 116–124.

7. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Компьютерная экспресс-диагностика, основанная на регистрации изменений цветовых характеристик веществ различной физико-химической природы. Сборник материалов Третьей международной молодежной научной школы-семинара 12–16 сентября 2011 года «Современные методы анализа дифракционных данных (дифракционные методы для нанотехнологии)», Великий Новгород, с. 125–128.

8. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Экспресс-диагностика воды, основанная на регистрации изменений цветовых характеристик. Сборник материалов Третьей международной молодежной научной школы-семинара 12–16 сентября 2011 года «Современные методы анализа дифракционных данных (дифракционные методы для нанотехнологии)», Великий Новгород, с. 129–133.

9. Tkal V.A., Okunev A.O., Zhukovskaya I.A. Identification of close located structure defects in single crystals by digital processing methods. Book of abstracts. XTOP 2012.11th Biennial on High Resolution X-Ray Diffraction and Imaging and Youth International School-Conference «Modern Methods of Diffraction Data Analysis and Topical Problem of X-Ray Optics» -15th-20th September, St. Petersburg, Russia, p188.

10. Ткаль В.А., Окунев А.О., Жуковская И.А. Цифровые методы повышения качества топографических изображений. Сборник тезисов докладов научной конференции 27–28 ноября 2012 года «ЛАНУЭ-100. Рентгеноструктурные исследования», Нижний Новгород, с. 98-100.

11. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А., Водолазова Н.Н. Цифровая экспресс-диагностика качества веществ различной физико-химической природы. Сборник материалов Четвертой международной молодежной научной школы-семинара 19–27 августа 2013 г. «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», Великий Новгород, с. 124–127.

12. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А., Водолазова Н.Н. Цифровая экспресс-диагностика качества воды, используемой в различных производствах. Сборник материалов Четвертой международной молодежной научной школы-семинара 19–27 августа 2013 г. «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», Великий Новгород, с. 128–130.

13. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Цифровая обработка поляризационно-оптических изображений дефектов структуры монокристаллов. Сборник материалов Четвертой международной молодежной научной школы-семинара 19–27 августа 2013 г. «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», Великий Новгород, с. 131–133.
14. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Количественная оценка эффективности цифровой обработки HDR-изображений. Сборник материалов Четвертой международной молодежной научной школы-семинара 19–27 августа 2013 г. «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», Великий Новгород, с. 134–135.
15. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Цифровая обработка топографических изображений дефектов структуры монокристаллов. Сборник материалов Шестого международного научного семинара 19–27 августа 2013 г. «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», Великий Новгород, с. 234–235.
16. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Количественные критерии оценки эффективности цифровой обработки изображений: теория и эксперимент. Сборник материалов Шестого международного научного семинара 19–27 августа 2013 г. «Современные методы анализа дифракционных данных и актуальные проблемы рентгеновской оптики», Великий Новгород, с. 236–242.
17. Alexey Okunev, Galina A. Verozubova, Chunhui Yang, Chongqiang Zhu, Valery Tkal, Vladimir Staschenko, Inga A. Zhukovskaya. The Analysis of Defects in ZnGeP₂ Single Crystals from Birefringence Images. Book of abstracts. 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-17 Conference). August 11-16, 2013. Warsaw, Poland, p. 158-160.
18. Valery Tkal, Alexey Okunev, Anna V. Sharaeva, Inga A. Zhukovskaya. Quantitative Criteria of Image Quality Evaluation, Theory and Experiment. Book of abstracts. 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-17 Conference). August 11-16, 2013. Warsaw, Poland, p. 167-168.
19. Valery Tkal, Alexey Okunev, Anna V. Sharaeva, Inga A. Zhukovskaya. Computer Diagnostics of Crystal Quality. Book of abstracts. 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-17 Conference). August 11-16, 2013. Warsaw, Poland, p. 168-169.
20. Alexey Okunev, Galina A. Verozubova, Chunhui Yang, Chongqiang Zhu, Valery Tkal, Inga A. Zhukovskaya, Vladimir Staschenko. Investigation of Defects in ZnGeP₂ Single Crystals by X-ray Topography on Base of Bormann Effect. Book of abstracts. 17th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE-17 Conference). August 11-16, 2013. Warsaw, Poland, p. 207-209.
21. A.O. Okunev, G.A. Verozubova, V.A. Tkal, V.A. Staschenko, I.A. Zhukovskaya. Imaging of Defects in ZnGeP₂ Single Crystals by X-ray Topography on Base of Bormann Effect. Book of abstracts. Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures and Electron, Positron, Neutron

- and X-ray Scattering under External Influences September 23-27, 2013, Yerevan, Armenia, p. 90.
22. V.A. Tkal, A.O. Okunev, A.V. Sharaeva, I.A. Zhukovskaya Features of Digital Processing of Topography Contrast in Single Crystal Materials. Book of abstracts. Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures and Electron, Positron, Neutron and X-ray Scattering under External Influences September 23-27, 2013, Yerevan, Armenia, p. 93.
23. V.A. Tkal, A.O. Okunev, A.V. Sharaeva, I.A. Zhukovskaya. Quantitative Criteria for Quality Evaluation of Single Crystal Topography Images. Book of abstracts. Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures and Electron, Positron, Neutron and X-ray Scattering under External Influences September 23-27, 2013, Yerevan, Armenia, p. 94.
24. Окунев А.О., Верозубова Г.А., Ткаль В.А., Стащенко В.А., Жуковская И.А. Анализ дефектов структуры монокристаллов $ZnGeP_2$ методами рентгеновской топографии и фотоупругости. Международный симпозиум «ФИЗИКА КРИСТАЛЛОВ 2013» посвященный 100-летию со дня рождения профессора М.П. Шаскольской. Тезисы докладов. – М.: МИСиС, 2013, с. 173
25. Ткаль В.А., Окунев А.О., Жуковская И.А. Количественные критерии оценки качества топографических изображений дефектов структуры монокристаллов. Международный симпозиум «ФИЗИКА КРИСТАЛЛОВ 2013» посвященный 100-летию со дня рождения профессора М.П. Шаскольской. Тезисы докладов. – М.: МИСиС, 2013, с. 231.
26. Ткаль В.А., Окунев А.О., Жуковская И.А. Повышение быстродействия вейвлет-обработки экспериментального контраста монокристаллов. Международный симпозиум «ФИЗИКА КРИСТАЛЛОВ 2013» посвященный 100-летию со дня рождения профессора М.П. Шаскольской. Тезисы докладов. – М.: МИСиС, 2013, с. 232.

Цитируемая литература:

1. Ткаль В.А., Окунев А.О., Жуковская И.А. Яркий и частотный анализ изображений дефектов структуры. LAP LAMBERT Academic Publishing Germany. 2012, 385 с. ISBN 978-3-8465-8855-0
2. Ткаль В.А., Жуковская И.А. Цифровые методы повышения качества экспериментального контраста дефектов структуры монокристаллов. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. № 4. С. 28–37.
3. Ткаль В.А., Шараева А.В., Жуковская И.А. Компьютерная диагностика качества. LAP LAMBERT Academic Publishing Germany. 2012, 385 с. ISBN 978-3-359-22771-4

Работа выполнялась при поддержке Гранта РФФИ №12-02-00201.