

СПЕКТРАЛЬНО-ТЕКСТУРНЫЙ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЬ ПИЩЕВЫХ СРЕД

А.В. Бондаренко¹, А.Н. Дроханов^{2,3*}, И.Н. Компанец²,
А.Е. Краснов³, С.А. Михайленко^{2,3**}

¹ ООО «Растр Технолоджи»

² Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН

³ Московский Государственный университет технологий и управления

* drohan@sci.lebedev.ru ** serg231@sci.lebedev.ru

Аннотация

Представлены итоги первого этапа разработки автоматизированного опто-электронного комплекса «СПЕКТР», предназначенного для спектрально-текстурного экспресс-контроля пищевых сред. В основу работы комплекса положен телевизионный спектрозональный метод получения информации об исследуемых объектах. Описано устройство комплекса, принцип работы и обработка получаемых данных. Рассмотрены перспективы и возможные области применения комплекса.

Ключевые слова: компьютерная квалиметрия, спектрозональный метод, автоматизация, оптоэлектроника, телевидение, спектрально-текстурные портреты.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема

Продовольственная безопасность России зависит не только от наличия продуктов питания на потребительском рынке, но и от их качества. Известно, что в настоящее время на рынке присутствует большое количество фальсифицированных продуктов питания, вино-водочных изделий, безалкогольных напитков и даже лекарств. В погоне за прибылью производители пищевых сред в процессе производства часто используют недоброкачественные и запрещенные компоненты. Технология производства, сроки и условия хранения продуктов питания часто нарушаются. Все это подрывает здоровье потребителей и даже приводит к вспышкам массовых отравлений. Почти ежедневно в средствах массовой

информации сообщается о подобных происшествиях.

Особенно пагубной для населения является изготовление и реализация фальсифицированной вино-водочной продукции. «Паленая» водка вызывает тяжкие отравления, приводящие к летальным исходам. Так, в 2006 г. от употребления крепкого алкоголя и суррогатов умерло около 40 тыс. человек. По имеющимся данным, только в Москве поддельная водка занимает четвертую часть, а в регионах процент контрафакта достигает половины всей алкогольной продукции [1].

Очевидно, что в условиях ухудшающейся экологии, низкой продолжительности жизни населения России и тяжелой демографической ситуации необходимо принятие срочных мер, направленных на разработку средств, обеспечивающих доступный, массовый, достоверный и оперативный контроль качества продуктов питания.

Контроль качества продуктов

В настоящее время в пищевой промышленности используются две группы показателей качества продуктов: органолептические и инструментальные. Однако, как показано ниже, и те, и другие обладают существенными недостатками и не обеспечивают должного контроля качества.

Органолептические показатели контроля качества продуктов

Для получения органолептических показателей используются органы чувств человека: зрение, обоняние, осязание и вкус. Такие показатели даются экспертами – дегустаторами, которые оценивают цвет продукта, интенсивность окраски, прозрачность, внешний вид, вкус и запах, консистенцию, структуру или текстуру.

Органолептическая оценка трудно воспроизводима, и потому в мире не существует общепринятой методики органолептического анализа. Идентификация многокомпонентных жидкостей, в частности, напитков, – наиболее трудная задача органолептических испытаний. Сравнение дегустируемого образца со стандартом требует длительной тренировки вкусовой памяти. Имеющиеся в настоящее время достижения науки и техники пока не смогли заменить дегустатора.

С начала 90-х гг. прошлого века предпринимаются попытки автоматизировать тестирование пищевых продуктов, прежде всего жидких. Речь идет о разработке устройств типа «электронный язык», содержащих наборы сенсоров, подобных вкусовым рецепторам человека. Каждый такой рецептор является индикатором для одного вещества или группы веществ. В результате погружения пакета таких сенсоров в исследуемую жидкость формируется набор признаков, которые записываются в память компьютера как вкусовой образ данной жидкости. Специальное программное обеспечение позволяет проводить сравнение этого образа с заранее сформированным в базе данных эталоном, после чего предъявляется результат. К сожалению, ни одна такая разработка пока не получила широкого распространения. Причиной этого является ограниченность набора сенсоров, их дороговизна и недолговечность. Кроме того, разные жидкости требуют разных сенсорных датчиков [2].

Применяемые в настоящее время традиционные методы органолептического анализа можно разделить на два больших класса: класс аналитических методов и класс потребительских методов.

К классу *аналитических* относятся следующие три вида оценок: различительные, описательные и оценки с использованием шкал и категорий [3–5]. Дегустаторы, для выполнения аналитической оценки, должны соответствовать определенным требованиям. Рекомендуемое число дегустаторов – от 1 до 20 или более [3]. Научно обоснованное определение необходимого количества экспертов приведено в работах [6, 7]. Результаты органолептического анализа, полученные дегустационной комиссией, как правило, вполне достоверны и воспроизводимы [8].

При *потребительской* оценке результаты испытаний основаны на интегрированном восприятии и обычно выражаются в виде симпатии или антипатии. Желательно, чтобы испытатели, проводящие оценку, являлись постоянными потребителями оцениваемых продуктов и были хорошо знакомы с их органолептическими характеристиками и особенностями [9].

1. Надо отметить, что существует значительная разница между потребительской и аналитической оценкой. В потребительских тестах изменчивость индивиду-

альных оценок отражает отношение к данному продукту, а в аналитическом испытании исследуется изменение исключительно одного свойства продукта, при этом изменчивость считается ошибкой эксперимента [3].

2. Из изложенного нетрудно заключить, что органолептические методы контроля качества пищевых продуктов не являются массовыми, доступными и оперативными.

Инструментальные оценки качества продуктов

Для получения инструментальных оценок применяются специализированные методы и приборы, дающие количественную информацию о физических, химических и биологических свойствах продуктов. На сегодняшний день наиболее информативными методами и средствами, позволяющими получить описание различных физико-химических и биологических свойств пищевых сред, являются методы и средства спектроскопии, хроматографии и ферментативных реакций [10–16].

Наибольшее количество информации дают спектральные методы, заключающиеся в возмущении равновесных состояний пищевых сред широкополосными воздействиями различных физических полей и в измерении откликов на эти воздействия [12].

Потребительские свойства пищевых сред в значительной степени зависят не от их тонкой структуры, а от более крупных структурных образований – агрегатов макромолекул. Для исследования свойств таких образований используют следующие методы получения спектральных данных:

- ★ метод теплового удара – мгновенное изменение локальной (поверхностной) температуры среды (например, излучением полупроводникового лазера) и измерение температурного отклика этой среды [11],

- ★ метод акустического удара – мгновенное возбуждение в среде акустических (ультразвуковых) импульсов и измерение их спектральных характеристик [12],

- ★ метод электровозбуждения – возбуждение электротока в среде и измерение спектра мощности его флуктуаций [11, 12],

- ★ метод инфракрасной и СВЧ–спектроскопии (субмиллиметровой,

миллиметровой и сантиметровой) – измерение спектральных свойств среды в диапазонах длин волн от 0,75...80 мкм до 0,3...30см [12],

★ метод оптической спектроскопии – измерение спектральных свойств среды в диапазоне длин волн 0,2...1,0 мкм [11, 12].

Для проведения перечисленных выше исследований необходимы хорошо оборудованные лаборатории, а сами измерения требуют значительного времени и квалифицированного персонала. По этой причине перечисленные методы контроля качества пищевых продуктов не оперативны и не доступны для широкого применения.

В связи с изложенным очевидна необходимость разработки и применения новых инструментальных методов, простых и оперативных и, в то же время, способных давать достаточно точную количественную оценку качества пищевых сред. Совместное применение органолептических, известных инструментальных и новых оперативных и широко доступных инструментальных методов анализа позволит оперативно контролировать качество сырья и технологические процессы производства, а также готовую продукцию.

2. КОМПЬЮТЕРНАЯ КВАЛИМЕТРИЯ

Концепция «Компьютерной квалиметрии»

Для достоверного комплексного и оперативного оценивания качества продукции на современном техническом уровне необходима разработка программно-аппаратных систем, способных быстро анализировать огромное количество инструментальных и органолептических данных и предлагать оператору варианты возможных решений.

С целью реализации такой системы Красновым А.Е и Тырсиным Ю.А. в 2002 г. была предложена концепция «Компьютерной квалиметрии» [17]. Концепция подразумевает использование известных инструментальных средств, а также разработку и применение новой аппаратуры для оперативного контроля физико-химических, оптических, реологических и биологических характеристик пищевых сред, данные от которых передаются в компьютерную экспертную систему. Согласно этой концепции программно-аппаратная система анализирует

полученные инструментальные данные совместно с органолептическими характеристиками контролируемых сред. По мере накопления данных и знаний такая компьютерная экспертная система сможет оперативно и объективно давать оценки качества исследуемых продуктов.

Структурная схема компьютерной квалиметрии показана на Рис. 1.

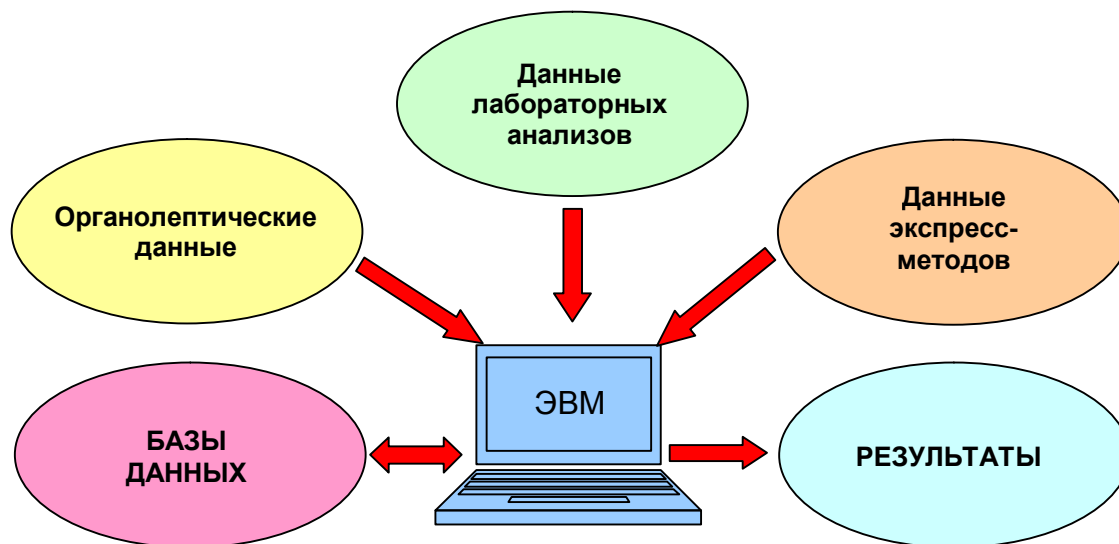


Рис. 1. Структурная схема компьютерной квалиметрии

В рассматриваемую концепцию могут органически войти новые оперативные инструментальные методы исследования пищевых сред, которые разрабатываются в различных научно-исследовательских институтах России.

Технология «Высыхающей капли»

К одному из новых удачных инструментальных методов можно отнести технологию интегрального контроля жидких пищевых сред, позволяющую оперативно сравнивать исследуемый образец с эталонной средой, которая названа авторами технологией «Высыхающей капли» [18]. Исследуемая жидкость в объеме 5 мкл наносится на поверхность кварцевого резонатора, подключенного к измерительной схеме. Поверхность резонатора совершает сдвиговые колебания с ультразвуковой частотой. В капле возбуждается сдвиговая волна, чувствительная к зарождению центров кристаллизации. Измерительная схема регистрирует реакцию резонатора на вносимый объектом акустомеханический импеданс

(АМИ) и его динамику через заданные промежутки времени до полного испарения растворителя. Запись этого сигнала – «диаграмма высыхания», отражающая динамику фазовых переходов в высыхающей капле, может быть визуализирована на экране компьютера, как в режиме реального времени, так и после занесения в базу данных (Рис. 2). График получаемой зависимости, как отпечаток пальца, является паспортной характеристикой жидкости.

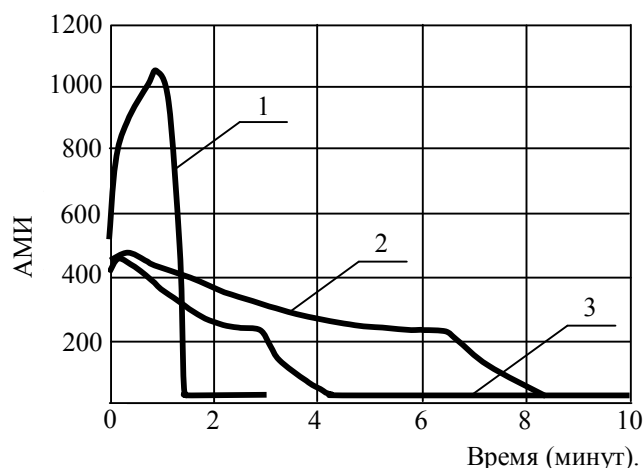


Рис. 2. Динамика фазовых переходов при высыхании капель:
1– этиловый спирт; 2– шотландское виски «Chivas regal-premium»;
3– водка «Нижегородский губернатор».

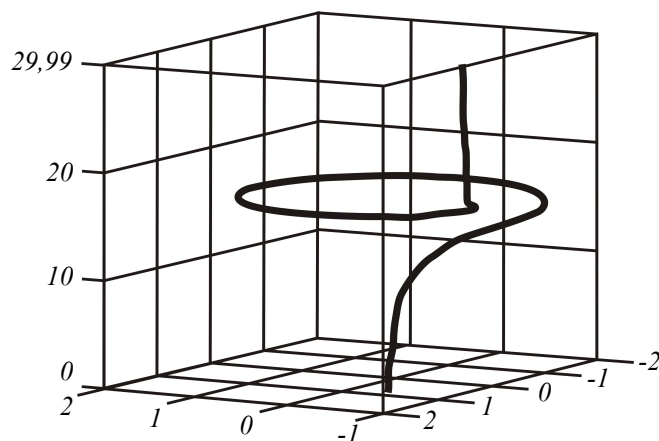


Рис. 3. Трехмерная диаграмма процесса высыхания капли минеральной воды

Авторы разработали вариант устройства, которое позволяет одновременно регистрировать как модуль, так и фазу сигнала. Это дает возможность отображать динамику процесса либо в виде годографа на комплексной плоскости в координатах «реальная и мнимая компоненты сигнала», либо в виде трехмерной диаграммы в координатах «время, реальная и мнимая компоненты сигнала» (Рис. 3). Такие «фазовые портреты» могут облегчить контроль технологии или выявить фальсифицированную продукцию.

В работе [18] пока не проводится сравнение анализируемых данных с данными эталона и не содержатся предложения по автоматизации процесса контроля. Тем не менее, очевидно, что новые методы контроля пищевых сред, подобные вышеприведённому, смогут найти широкое применение в компьютерной

квалиметрии.

Спектрозональный метод

Для практической реализации концепции «Компьютерной квалиметрии» кафедрой «Информационные технологии» Московского государственного университета технологий и управления (МГУТУ) и Отделом оптоэлектроники Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) организована Межинститутская научно-исследовательская лаборатория оптоэлектронной квалиметрии (МНИЛОК), деятельность которой нацелена на разработку программно-аппаратных комплексов для оперативного контроля пищевых сред, продуктов питания, биологических, лекарственных и иных объектов. При этом подразумевается, что создаваемая аппаратура должна быть недорога, широко доступна и оперативна в работе.

Известно, что наибольшим быстродействием и оперативностью из всех методов исследования различных сред обладают оптические методы. Один из таких методов реализуется в автоматизированном оптоэлектронном телевизионном комплексе «СПЕКТР», который разрабатывается в МНИЛОК. В основу работы комплекса положен спектрозональный метод получения информации, который используется в аэро- и космической фотографии [19–21] и заключается в фотографировании местности через светофильтры, вырезающие узкие участки (зоны) видимого и инфракрасного спектров.

Классический эффект применения спектрозонального метода иллюстрируется на Рис. 4, где приведены спектральные характеристики отражения лиственного и хвойного леса. Если сфотографировать смешанный лес на панхроматической пленке в видимой части спектра (до 0,7 мкм), то хвойные породы практически будут сливаться с лиственными. Но если сфотографировать тот же лес с помощью светофильтра, пропускающего узкую часть инфракрасного спектра с максимальной прозрачностью в области 0,8 мкм, то разница будет очевидной. Хвойные деревья выглядят на снимке значительно темнее лиственных [19].

Спектрозональный метод позволяет различать такие объекты, которые при обычной фотографии визуально неразличимы.

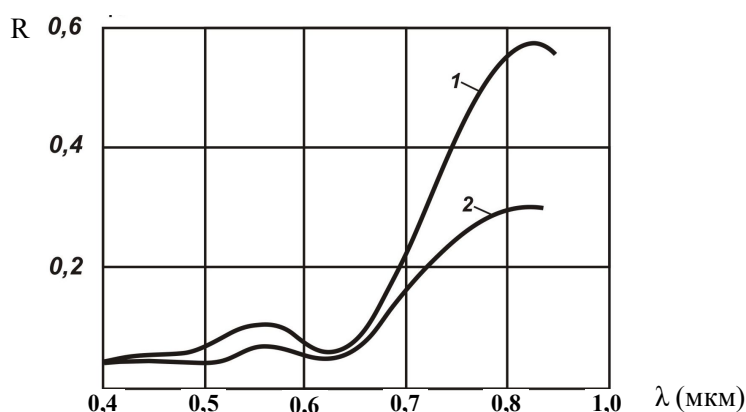


Рис. 4. Спектральные коэффициенты яркости:
1 – лиственного леса, 2 – хвойного леса.

Этот метод дает возможность дифференцировать исследуемые объекты и автоматизировать обработку получаемых данных, основываясь на спектральных образах объектов, формируемых в n -мерном пространстве, где n – число спектральных зон, в которых выполняется съемка.

Ниже описаны устройство и характеристики опытного образца автоматизированного оптоэлектронного телевизионного комплекса «СПЕКТР», использующего спектрально-аналитический метод анализа пищевых и биологических сред, а также рассмотрены возможности его дальнейшего развития. Применение комплекса для целей анализа и контроля качества пищевых сред хорошо вписывается в концепцию компьютерной квалиметрии.

3. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ ТЕЛЕВИЗИОННЫЙ КОМПЛЕКС «СПЕКТР»

Общая характеристика комплекса

Комплекс предназначен для оперативного контроля спектров отражения и пропускания жидких и твердых пищевых сред, а также для анализа текстуры поверхности последних. Кроме того, он позволяет оценивать поляризацию отраженного и прошедшего через среду оптического излучения.

На комплексе можно выполнять экспресс-диагностику качества пищевых продуктов и биологических сред путем измерения их отражающей (пропускающей) способности в узких спектральных диапазонах ультрафиолетового, види-

мого и инфракрасного спектра, и последующего автоматического сравнения полученных данных с данными эталона.

Как показала обработка результатов исследований Земли, при дешифрировании снимков земной поверхности только по спектральному признаку надежность распознавания лесов, открытых пространств, городов и водных поверхностей составила 74 %. Добавление к этому структурного признака привело к повышению достоверности до 99 % [22]. Отсюда следует, что для анализа и идентификации объекта исследования большое значение имеет структура изображения, свидетельствующая о пространственном распределении яркости на объекте съемки.

Как опознавательный признак, текстура объекта может быть использована в целях квалиметрии, что и реализовано в комплексе «СПЕКТР».

Практика аэрокосмических дистанционных исследований Земли показала, что спектральный метод наиболее эффективен при использовании черно-белых телевизионных «цветоделенных» изображений. При этом задача ставится обратная той, которая решается в черно-белом телевизионном вещании. В последнем стремятся сигнал изображения сделать пропорциональным яркости. Для этого спектральную характеристику передающей камеры $\varepsilon(\lambda)$ приближают к кривой видности глаза $k(\lambda)$. Тогда, для случая $\varepsilon(\lambda) = k(\lambda)$ и источника света с распределением $S(\lambda)$ сигнал, при передаче вида какой-либо поверхности со спектральной характеристикой отражения $\sigma(\lambda)$, будет пропорционален яркости объекта:

$$u = q \int_0^\infty S(\lambda) \varepsilon(\lambda) k(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где q – коэффициент пропорциональности.

Две одинаково освещенные поверхности с различными характеристиками отражения $\sigma_1(\lambda)$ и $\sigma_2(\lambda)$, но такими, что

$$\int_0^\infty S(\lambda) \varepsilon_1(\lambda) k(\lambda) d\lambda = \int_0^\infty S(\lambda) \varepsilon_2(\lambda) k(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

будут иметь одинаковую яркость и не будут различаться в правильно построен-

ной телевизионной системе. В спектрзональном методе, при котором вырезается определенная узкая часть спектра, стремятся к тому, чтобы $\varepsilon(\lambda)$ весьма резко отличалось от $k(\lambda)$. Поэтому сигналы от двух объектов с различными $\sigma(\lambda)$ будут различны и создадут контраст в черно-белом изображении.

Преимущество телевидения по сравнению с аэрофотосъемкой заключается в значительно большей чувствительности телевизионной камеры. Более того, световые контрасты могут быть усилены с помощью регулировок сигнала в электрических цепях. В настоящее время разработаны высокочувствительные преобразователи оптического изображения в телевизионный сигнал (передающие трубки и ПЗС-матрицы), которые позволяют использовать узкополосные интерференционные светофильтры, а также акустооптические фильтры.

При разработке комплекса «СПЕКТР» был учтен опыт фотографической и телевизионной многозональной (спектро- и структурозональной) съемки. С целью обеспечения высокой оперативности и точности работы комплекса был выбран метод получения данных об объекте с помощью измерительной черно-белой ТВ-камеры высокой чувствительности и разрешения. С её помощью в узких спектральных диапазонах спектра формируют «цветоделенные» черно-белые телевизионные изображения, которые обладают высокими измерительными свойствами. При этом стабильность работы аппаратуры достигается весьма простыми средствами.

Возможны два вида телевизионной многозональной съемки: активная и пассивная. При активной многозональной съемке для освещения объекта исследования используются специальные источники, излучающие в узких спектральных диапазонах. Для пассивной многозональной съемки необходимы эталонный источник света и узкополосные оптические фильтры для выделения спектральных зон.

В основу работы комплекса «СПЕКТР» положена активная телевизионная многозональная съемка. При этом в качестве источников света, излучающих в узких спектральных диапазонах, используются калиброванные по цветовому интервалу люминесцентные светодиоды. Выбранный подход значительно упрощает техническую реализацию прибора, уменьшает затраты на его разработку,

снижает его стоимость и эксплуатационные расходы по сравнению с аппаратурой, в которой используется пассивная многозональная съемка.

Итак, в рассматриваемом комплексе с помощью черно-белой ТВ-камеры получают изображения $w_1, w_2, w_3, \dots, w_i, \dots, w_n$ контролируемого объекта в различных зонах $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \Delta\lambda_3, \dots, \Delta\lambda_i, \dots, \Delta\lambda_n$ спектра отраженных электромагнитных волн $S(\lambda)$ (Рис. 5), регистрируя при этом сигнал $u(\Delta\lambda_i)$ от каждого элемента светочувствительного датчика ТВ-камеры, которым является ПЗС-матрица. Из полученных черно-белых изображений $w_1, w_2, w_3, \dots, w_i, \dots, w_n$ формируют множество $\{W(\Delta\lambda_i)\}$, которое является спектральным образом объекта в n -мерном пространстве (Рис. 6).

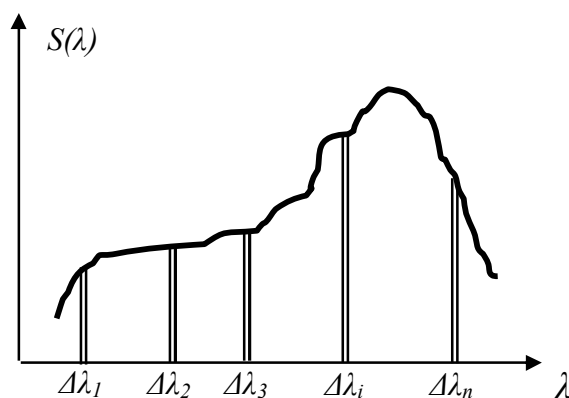


Рис. 5. Распределение энергии по спектру отражения $S(\lambda)$ в исследуемом объекте и зоны регистрации $\Delta\lambda_i$.

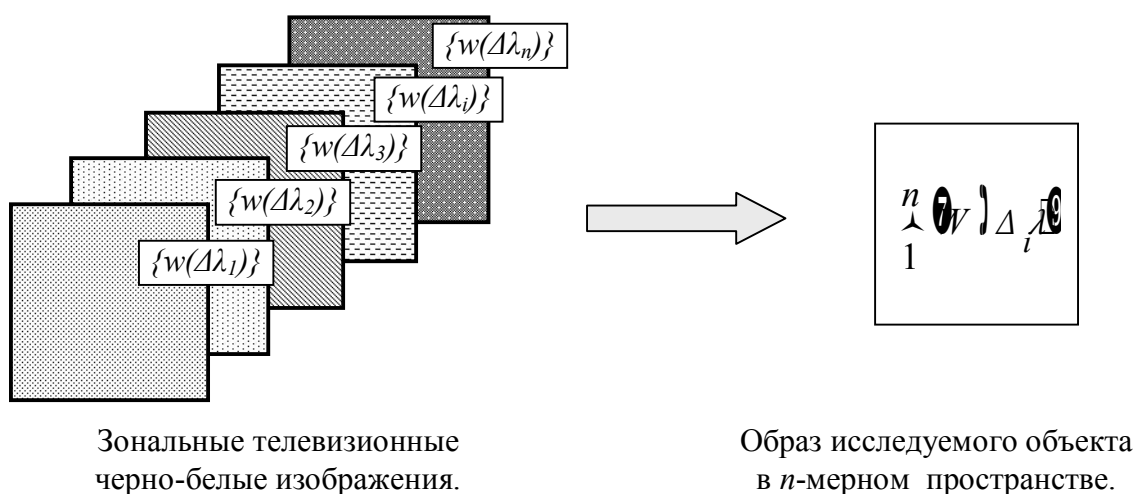


Рис. 6. Телевизионный спектрозональный метод.

Очевидно, что при разработке спектрозонального метода возникают задачи выбора числа, ширины и расположения спектральных зон, поскольку от этого зависит его чувствительность при определении различий между исследуемым объектом и эталоном.

Устройство комплекса

Блок-схема комплекса «СПЕКТР» показана на Рис. 7. Комплекс содержит датчик ТВ-сигнала в виде ч/б телевизионной камеры на основе ПЗС-матрицы, видеопроцессор с 12-ти битным АЦП [23], персональный компьютер (ПК) с базой данных, необходимой для сравнения исследуемой среды с эталоном, и программное обеспечение. В результате работы комплекса формируются оценки, которые предъявляются оператору (или автомату) для принятия решения. Использование видеопроцессора с 12-ти битным кодированием (4096 градаций серого) исходного изображения позволяет более точно настраиваться на входной телевизионный сигнал, обрабатывать и анализировать слабоконтрастные изображения исследуемых объектов [24, 25].

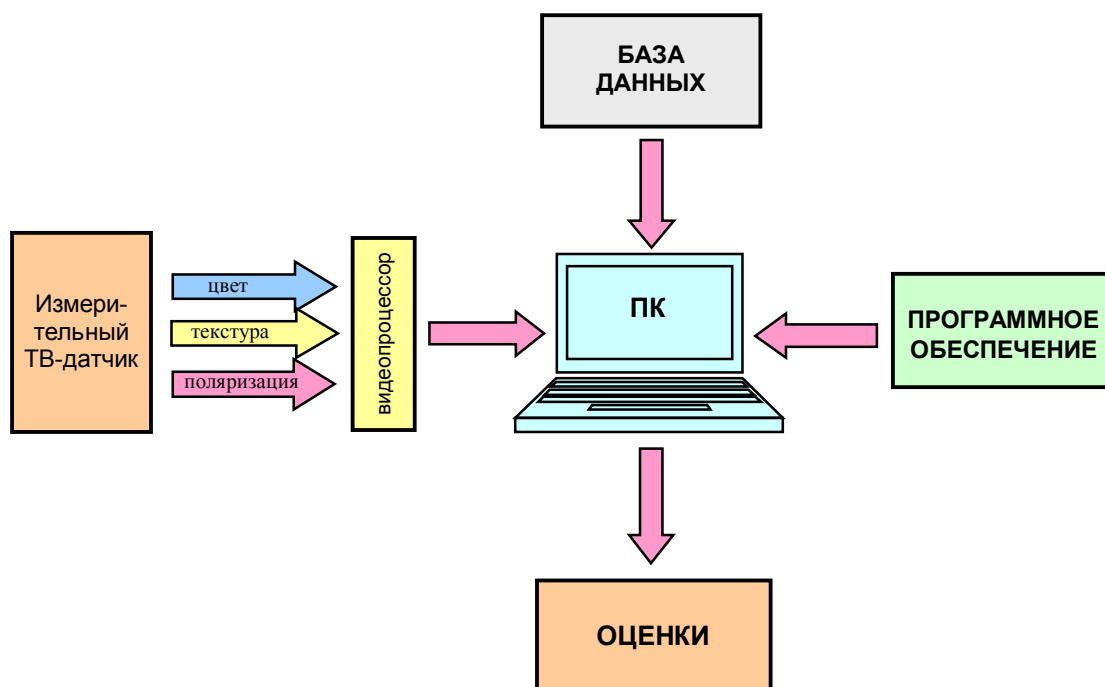


Рис. 7. Блок-схема комплекса «СПЕКТР» для спектрально-текстурной экспресс-оценки качества пищевых сред.

Общий вид опытного образца комплекса «СПЕКТР» приведен на Рис. 8. Здесь показан измерительный датчик ТВ-сигнала, подключенный к компьютеру через видеопроцессор. В установке используются светодиоды, излучающие в синем (B), зеленом (G), красном (R) и инфракрасном (IR) диапазонах длин волн.

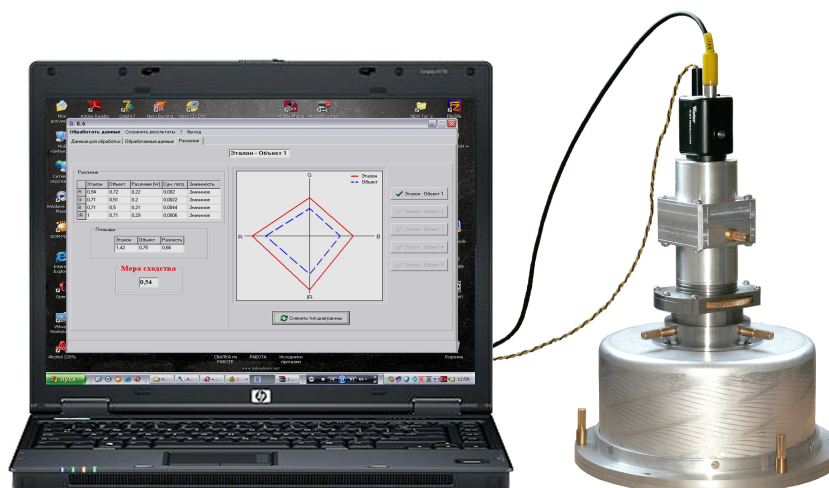


Рис. 8. Общий вид опытного образца комплекса «СПЕКТР».

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ НА КОМПЛЕКСЕ «СПЕКТР»

Спектрально-текстурные портреты

На Рис. 9 приведены в условных цветах спектрально-текстурные объемные (3D) портреты фрагментов изображений соевой муки (образец Sun-Green I-700), которые несут информацию об отражательной способности и текстуре образца в синем (B), зеленом (G), красном (R) и инфракрасном (IR) спектральных диапазонах.

Указанные портреты получены обработкой программой Origin фрагментов ТВ-изображений размером 100 тв. эл. x 100 строк. По оси Z отложены уровни сигнала. Из этих портретов следует, что усредненный коэффициент спектрального отражения (пьедестал) для данного образца возрастает при переходе от коротко- к длинноволновой области видимого и инфракрасного спектра. Кроме того, наблюдается изменение текстуры, сигнал от которой уменьшается с увеличением длины волны света.

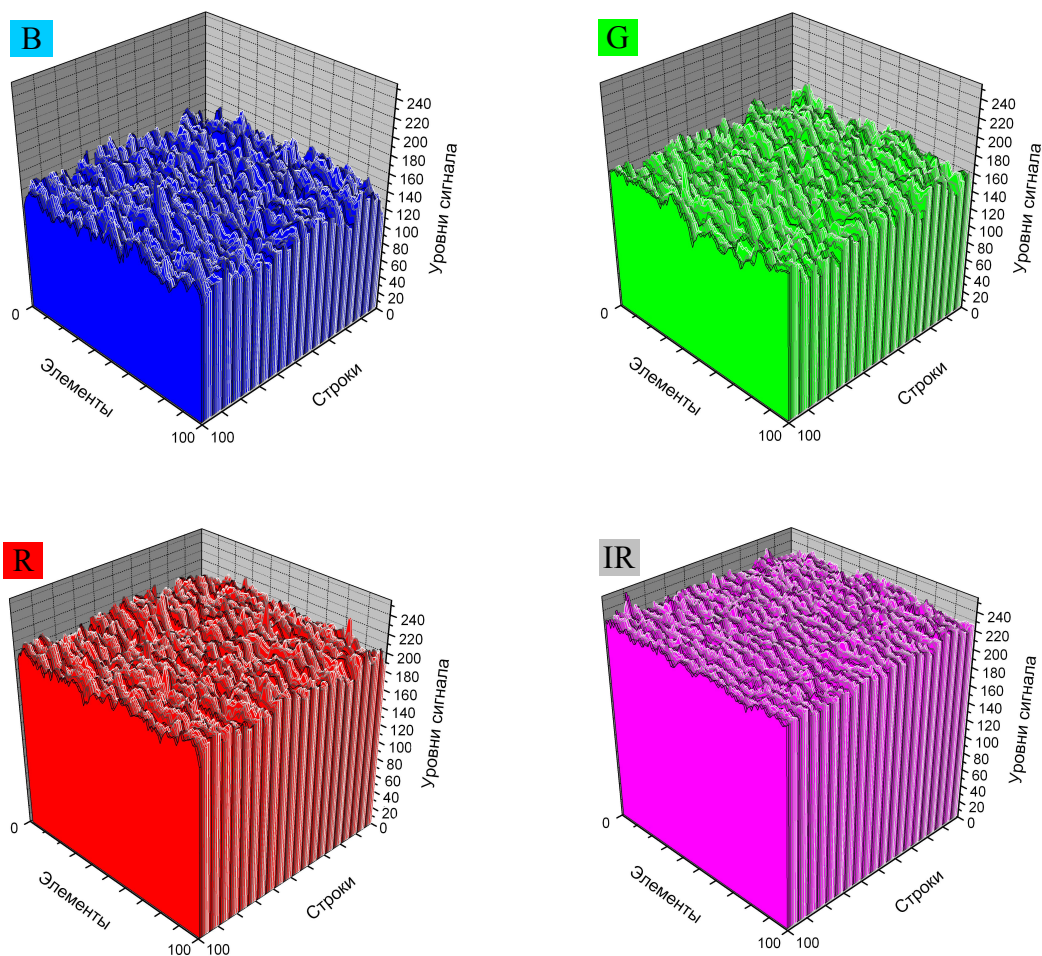


Рис. 9. Спектрально-текстурные портреты соевой муки в спектральных диапазонах *R*, *G*, *B* и *IR*.

Для обработки полученных данных были разработаны алгоритмы и программное обеспечение, которое позволяет оперативно построить лепестковые диаграммы и гистограммы спектральных коэффициентов отражения исследуемых объектов и сравнить их с данными эталонов.

В качестве примера на Рис. 10 приведены результаты такого сравнения для соевой муки разных производителей (образец – Sun-Green I-700, эталон – Supro EX-32), которые представлены в графическом виде.

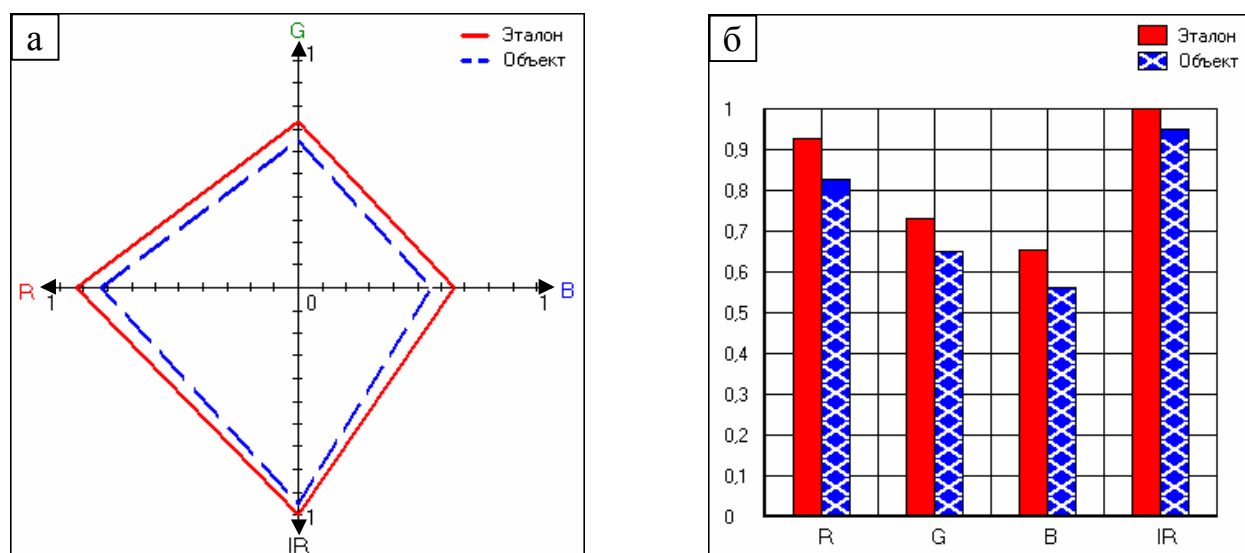


Рис. 10. Результат сравнения спектральных коэффициентов отражения двух сортов соевой муки в графическом виде:
а – лепестковая диаграмма; б – гистограмма.

В Таблице 1 приведена разность площадей лепестковых диаграмм, показанных на Рис. 10.

Таблица 1

Эталон	Объект	Разность
1,37	1,11	0,26

В Таблице 2 приведен результат аналитического сравнения спектральных коэффициентов отражения двух сортов соевой муки, вычислена суммарная погрешность измерений и определена значимость различий, исходя из доверительного интервала при коэффициенте доверия 95,4%.

Таблица 2

Спектральный диапазон	Эталон (нормированное значение)	Объект (нормированное значение)	Различие (W)	Суммарная погрешность	Значимость различия
R	0,93	0,83	0,1	0,0053	Значимое
G	0,73	0,65	0,08	0,0049	Значимое
B	0,66	0,56	0,09	0,0059	Значимое
IR	1	0,95	0,05	0,0024	Значимое

Определена также мера сходства между образцом и эталоном соевой муки по следующей формуле:

$$M = 1 - \sqrt{(k_R^\alpha - k_R^\beta)^2 + (k_G^\alpha - k_G^\beta)^2 + (k_B^\alpha - k_B^\beta)^2 + (k_{IR}^\alpha - k_{IR}^\beta)^2}, \quad (3)$$

где: $k_j^{\alpha\beta}$ – нормированные значения спектральных коэффициентов отражения эталона (α) и образца (β),
 j – спектральный диапазон.

Мера сходства в данном конкретном случае составила величину $M=0,83$.

Сравнение текстур объекта и эталона в различных спектральных диапазонах

Примеры сравнения текстур соевой муки двух разных производителей (образца и эталона) приведены на графиках Рис. 11, 12, 13 и 14, где показаны гistogramмы их относительных спектральных коэффициентов отражения.

На этих графиках отложены:

- ★ по оси абсцисс – относительные спектральные коэффициенты отражения $\chi = k/K$, где k – спектральный коэффициент отражения i -го элемента изображения, а K – максимальный спектральный коэффициент отражения в паре эталон – образец,

- ★ по оси ординат – относительное число элементов $\psi = n/N$, где n – число элементов изображения с определенным спектральным коэффициентом отражения, а N – общее число элементов в ТВ-изображении.

Из анализа гistogramм следует, что значения максимальных спектральных коэффициентов отражения исследуемого объекта в данном случае меньше аналогичных значений эталона. Особенно сильно это проявляется в инфракрасном спектральном диапазоне, где максимальное значение гistogramмы объекта $\psi_{об. max}^{IR}$ составляет 0,82 от аналогичной величины гistogramмы эталона $\psi_{эт. max}^{IR}$ (Табл. 3):

$$\psi_{об. max}^{IR} = 0,82 \psi_{эт. max}^{IR}$$

Кроме того, на уровнях $0,5\psi_{max}$ прослеживается уширение Δ гistogramм объекта по сравнению с гistogramмами эталона, величину которого можно

определить из выражения $\Delta = |\psi_{об.0,5}| / |\psi_{эт.0,5}|$. В Таблице 3 приведены значения указанного уширения. Эти данные могут свидетельствовать о более грубом помоле исследуемого образца соевой муки.

Таблица 3

Спектральный диапазон	B	G	R	IR
$\psi_{об. max} / \psi_{эт. max}$	0,97	0,88	0,95	0,82
Уширение Δ	1,08	1,15	1,09	1,25

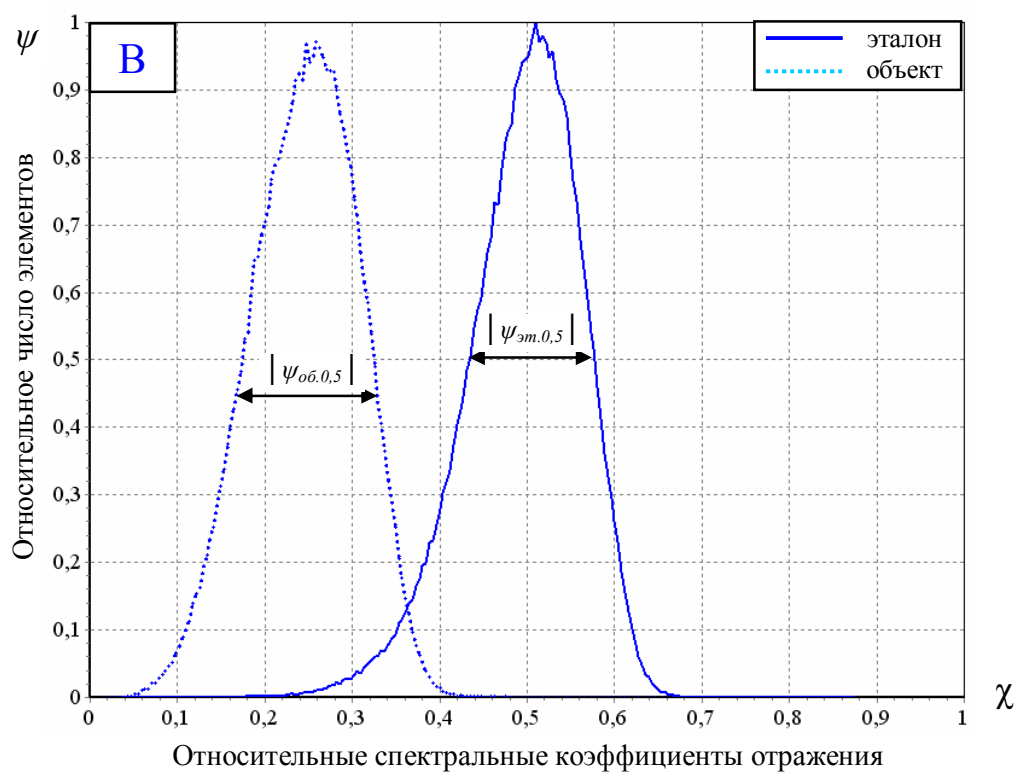


Рис. 11. Гистограммы относительных спектральных коэффициентов отражения элементов изображений образца и эталона в синем спектральном диапазоне.

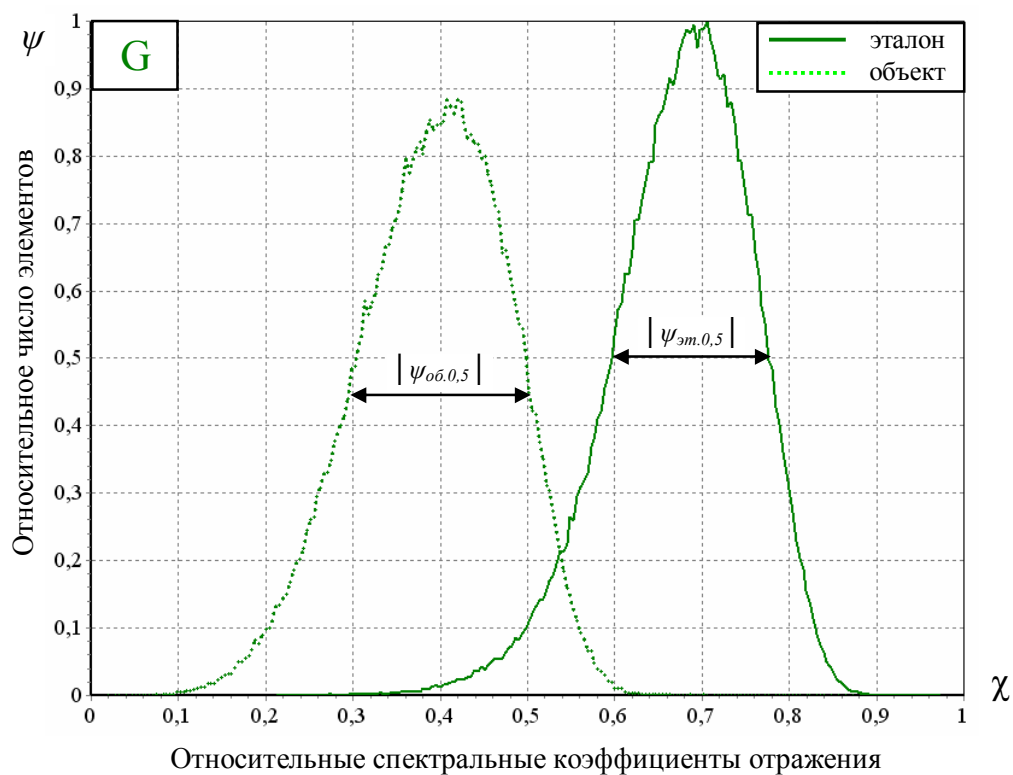


Рис. 12. Гистограммы относительных спектральных коэффициентов отражения элементов изображений образца и эталона в зеленом спектральном диапазоне.

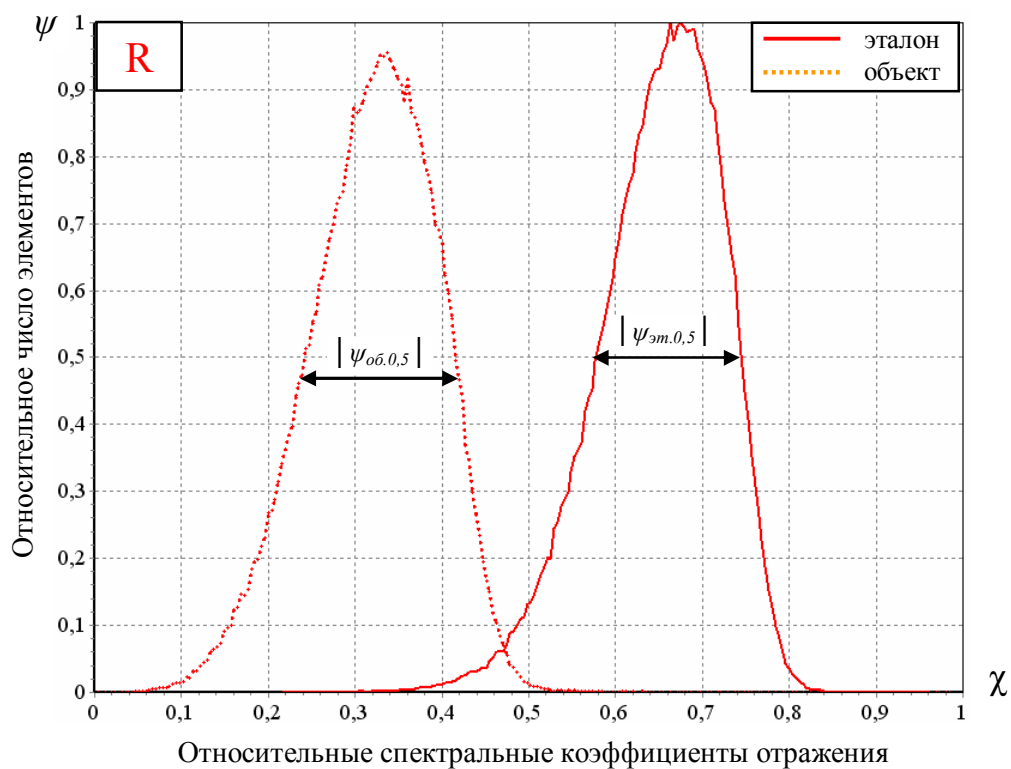


Рис. 13. Гистограммы относительных спектральных коэффициентов отражения элементов изображений образца и эталона в красном спектральном диапазоне.

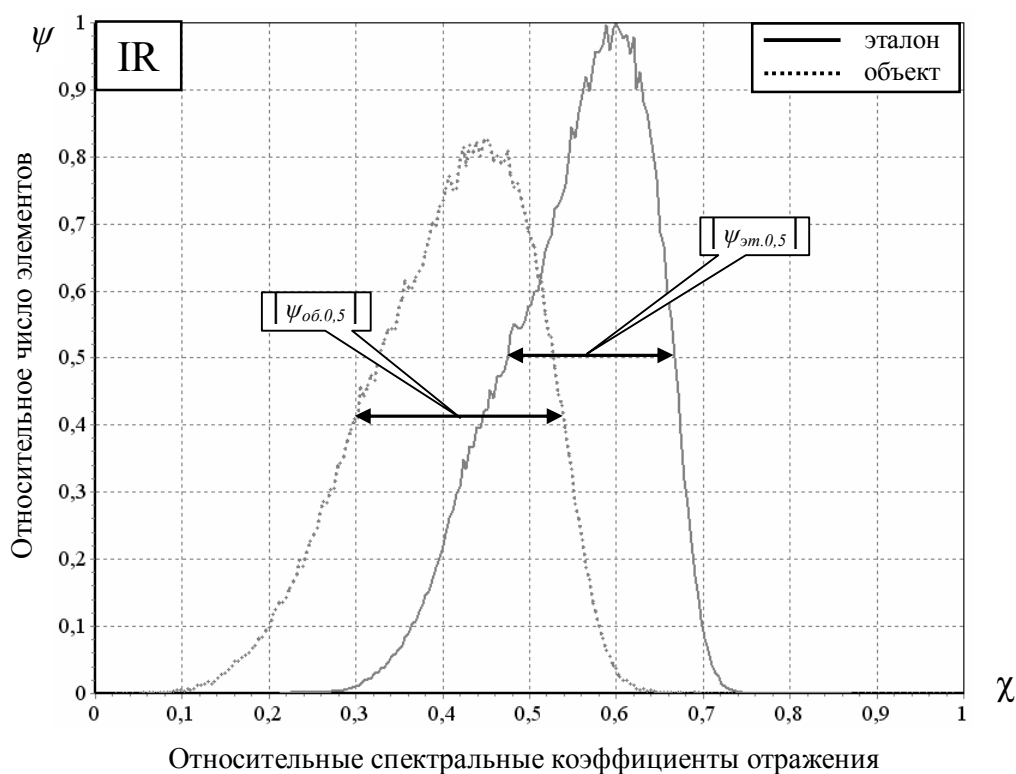


Рис. 14. Гистограммы относительных спектральных коэффициентов отражения элементов изображений образца и эталона в инфракрасном спектральном диапазоне.

Сравнение текстур объекта и эталона в поляризованном свете

Гистограммы относительных спектральных коэффициентов отражения текстур рассмотренных выше образцов соевой муки при меридиональной и сагиттальной поляризации отраженных от образца и эталона световых потоков в различных спектральных диапазонах приведены на Рис.15–18 (меридиональная поляризация) и Рис.19–22 (сагиттальная поляризация).

Как следует из приведенных графиков и Таблицы 4, различия гистограмм относительных спектральных коэффициентов отражения текстурных элементов объекта и эталона при поляризации отраженного света проявляется гораздо сильнее, чем при наблюдении объектов в обычном, не поляризованном свете (см. Таблицу 3). Значения максимальных спектральных коэффициентов отражения исследуемого объекта в поляризованном свете значительно меньше

аналогичных значений эталона. На уровнях $0,5\psi_{max}$ уширение Δ гистограмм объекта по сравнению с гистограммами эталона больше, чем при наблюдении в неполяризованном свете.

Таблица 4

Спектральный диапазон	B	G	R	IR
<i>Меридиональная поляризация</i>				
$\psi_{об. max} / \psi_{эт. max}$	0,7	0,75	0,74	0,86
Уширение Δ	1,54	1,41	1,44	1,11
<i>Сагиттальная поляризация</i>				
$\psi_{об. max} / \psi_{эт. max}$	0,62	0,63	0,65	0,86
Уширение Δ	1,71	1,65	1,67	1,13

Следует отметить, что результаты измерений в обычном и поляризованном свете в инфракрасном диапазоне практически не отличаются, поскольку используемый нами дихроичный фотографический светофильтр ПФ-42 в инфракрасном диапазоне не работает. По-видимому, применение поляризаторов света более сложной конструкции (например, призмы Рошона) на данном этапе разработки не имеет смысла, поскольку это неизбежно приведет к удорожанию установки. Полученные данные измерений в видимом диапазоне вполне достаточны для определения различий между объектом и эталоном.

Меридиональная поляризация

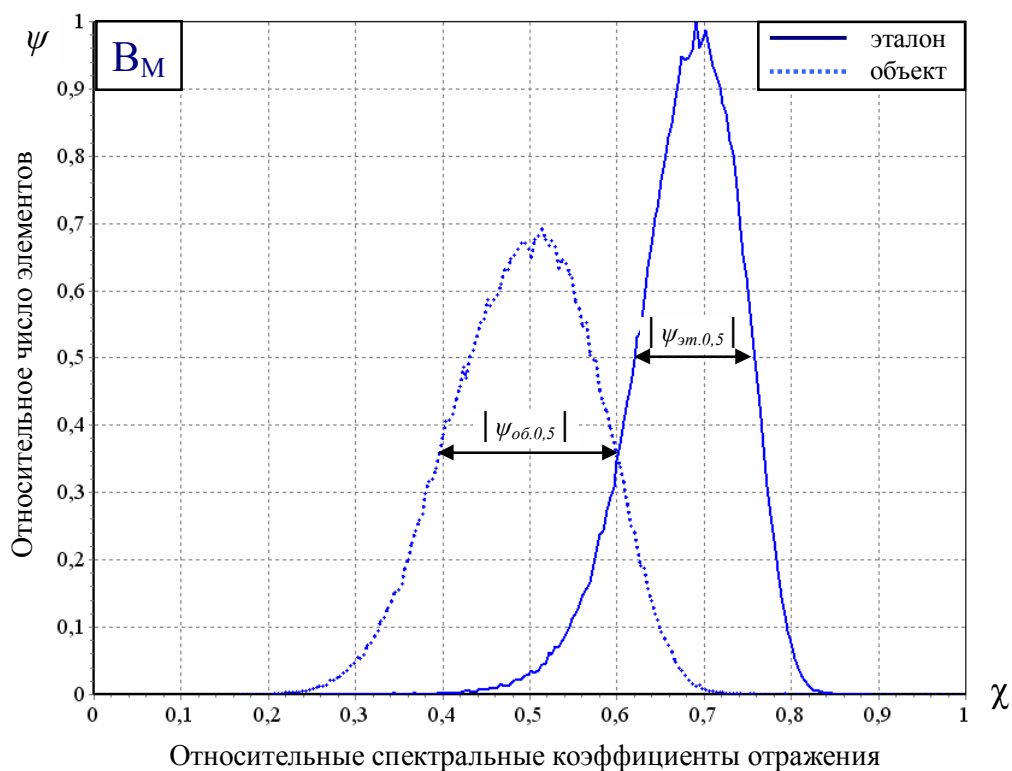


Рис. 15. Гистограммы относительных спектральных коэффициентов отражения элементов изображений образца и эталона в синем спектральном диапазоне.

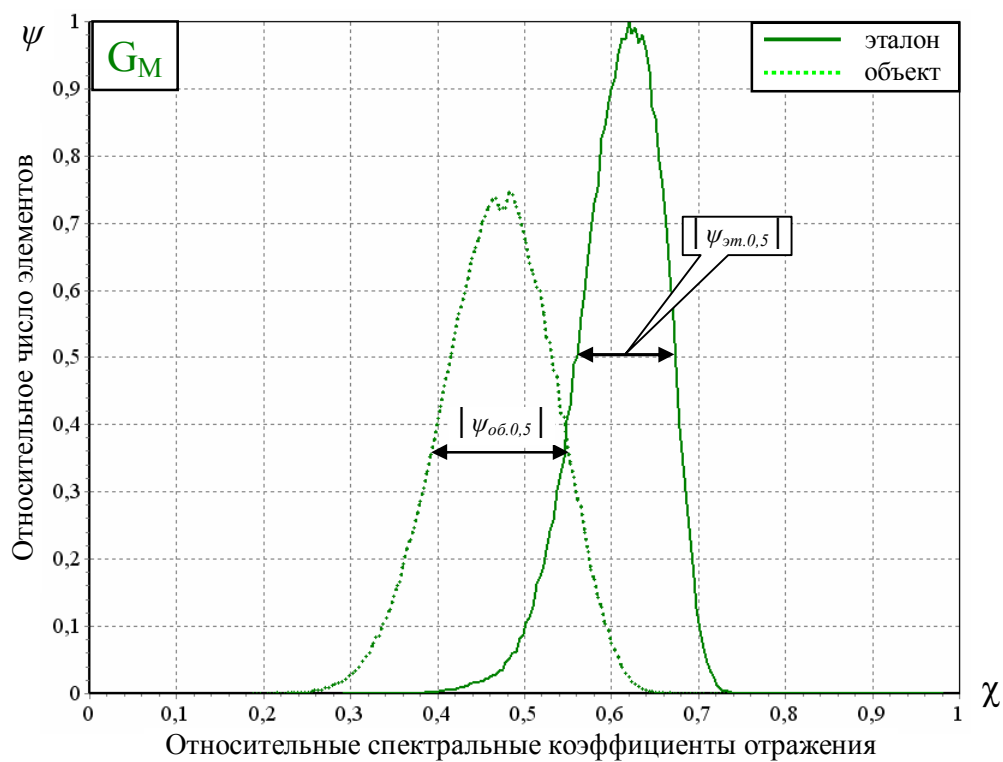


Рис. 16. Гистограммы относительных спектральных коэффициентов отражения элементов изображений образца и эталона в зеленом спектральном диапазоне.

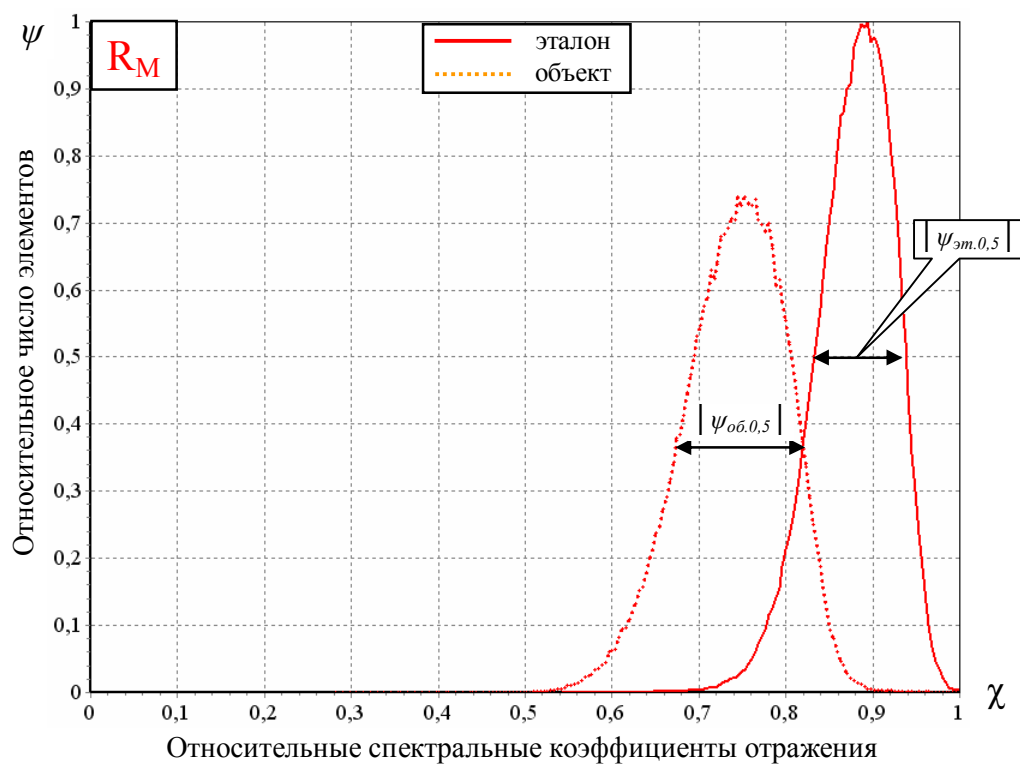


Рис. 17. Гистограммы относительных спектральных коэффициентов отражения элементов изображений образца и эталона в красном спектральном диапазоне.

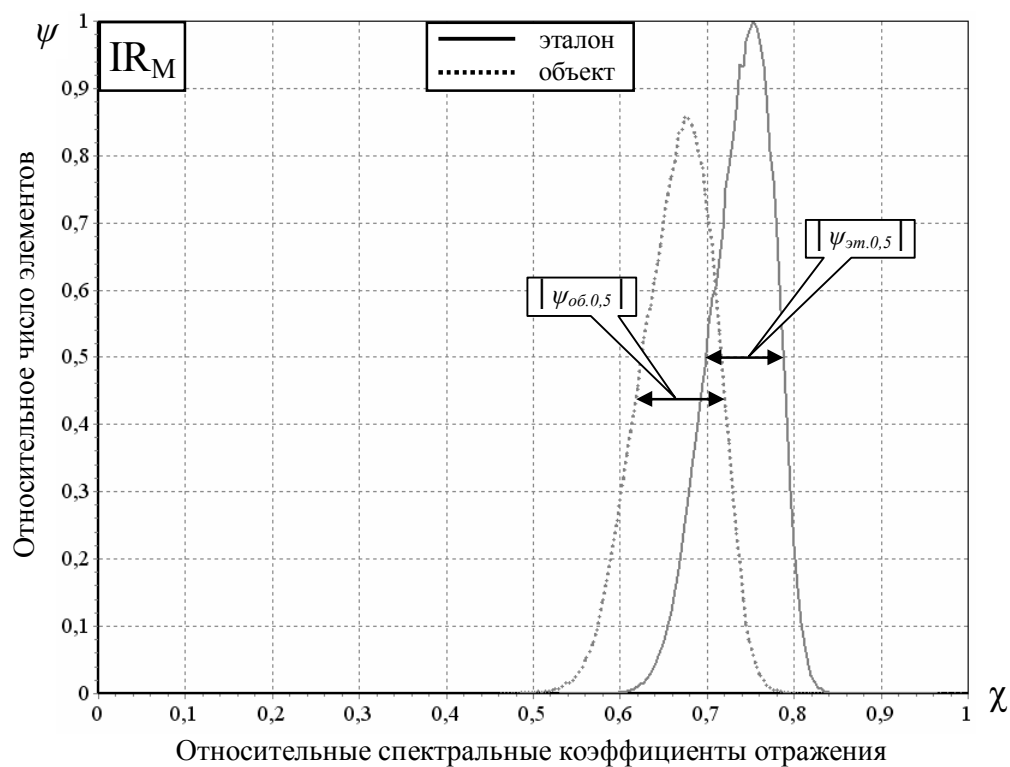


Рис. 18. Гистограммы относительных спектральных коэффициентов отражения элементов изображений образца и эталона в инфракрасном спектральном диапазоне.

Сагиттальная поляризация

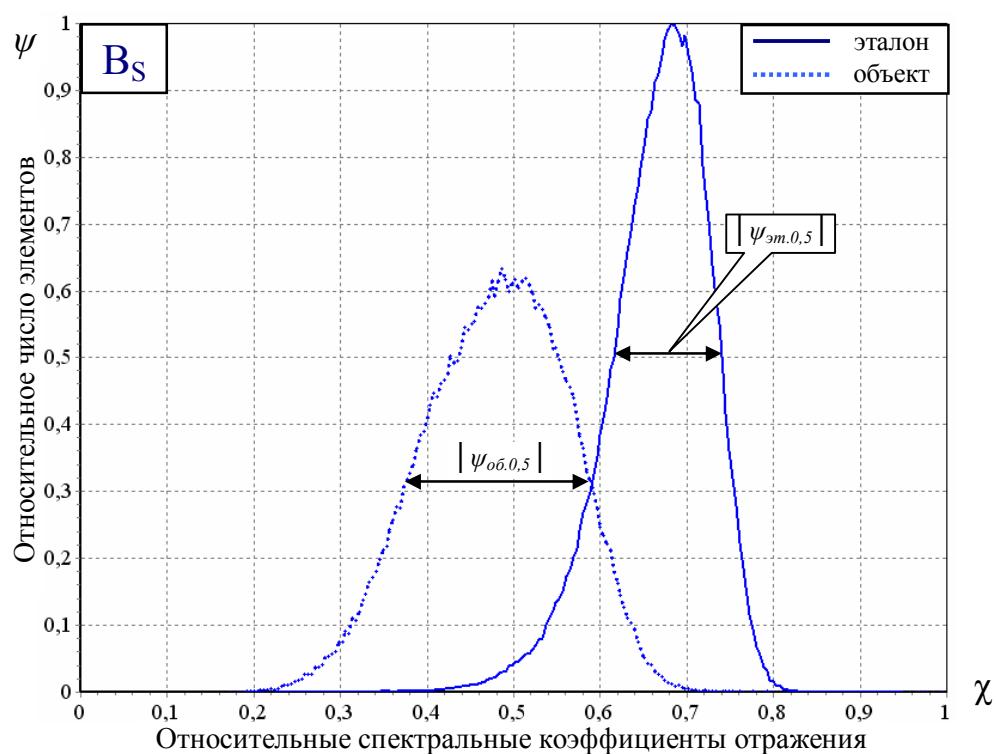


Рис. 19. Гистограммы относительных спектральных коэффициентов отражения элементов изображений образца и эталона в синем спектральном диапазоне.

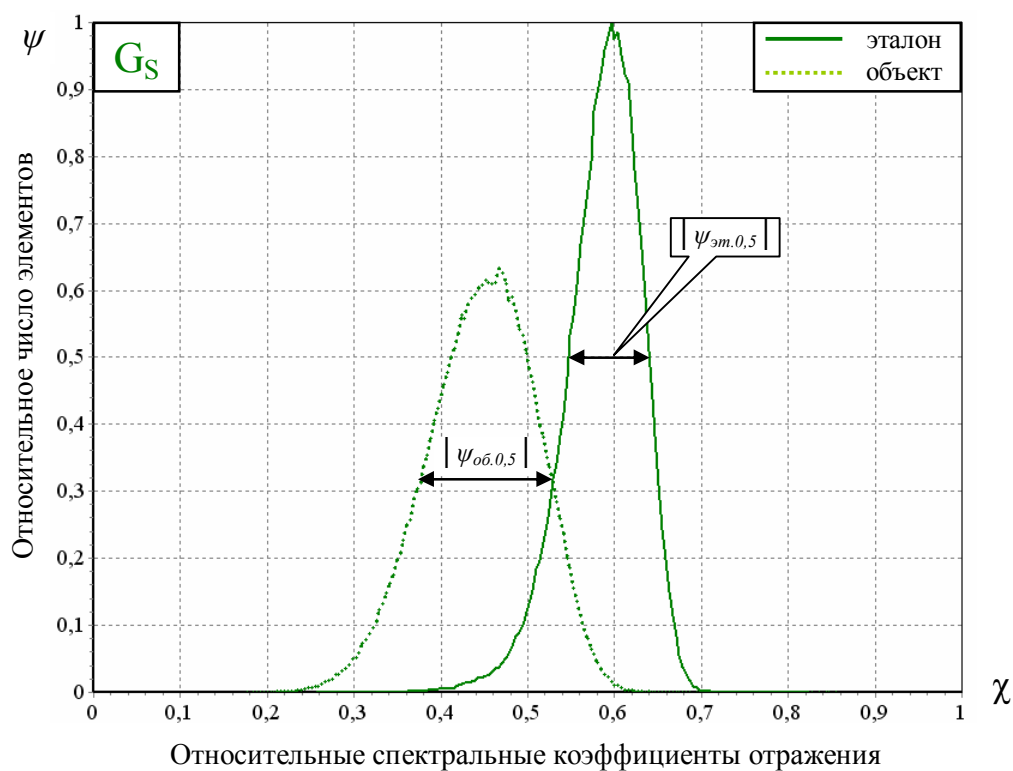


Рис. 20. Гистограммы относительных спектральных коэффициентов отражения элементов изображений образца и эталона в зелёном спектральном диапазоне.

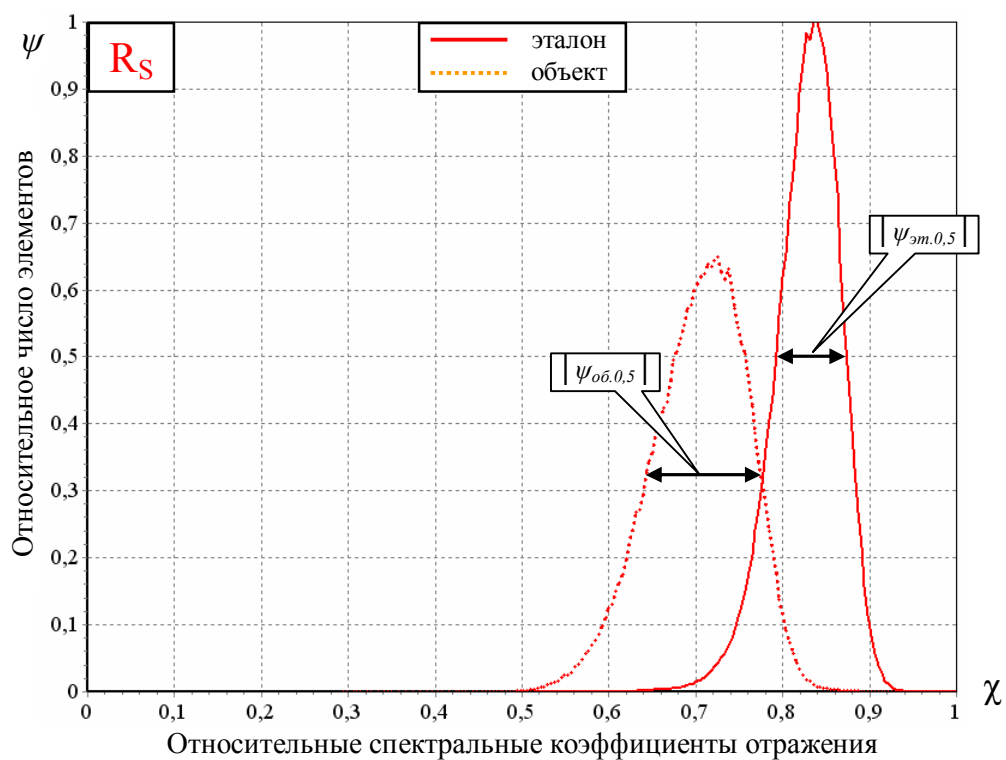


Рис. 21. Гистограммы относительных спектральных коэффициентов отражения элементов изображений образца и эталона в красном спектральном диапазоне.

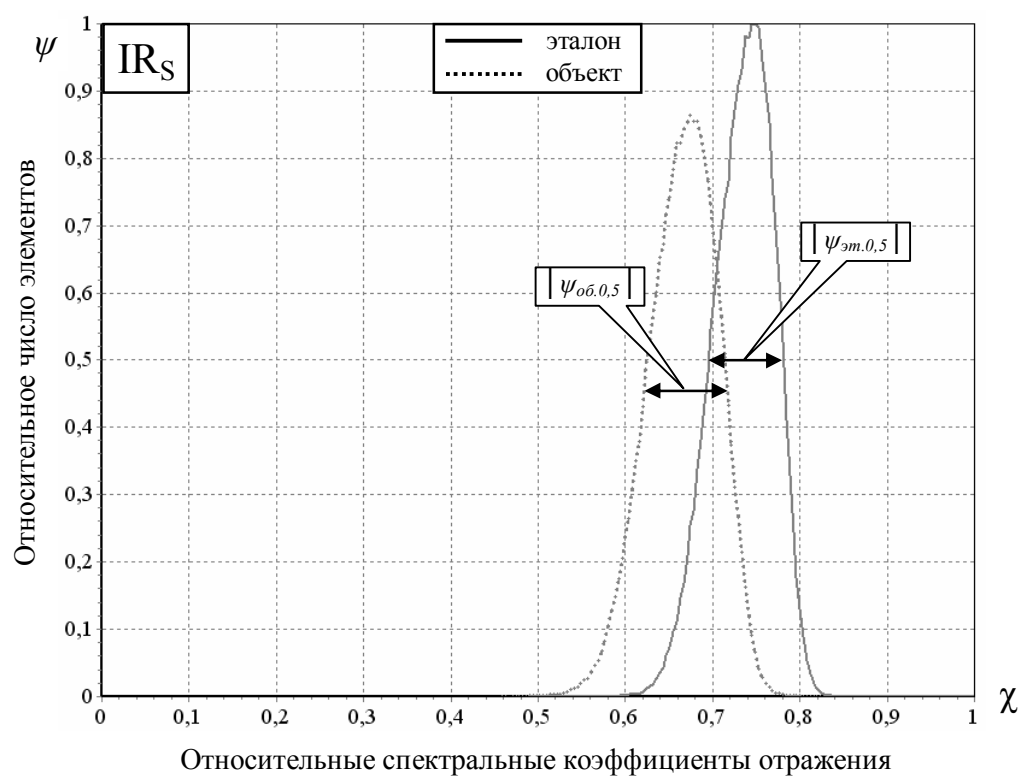


Рис. 22. Гистограммы относительных спектральных коэффициентов отражения элементов изображений образца и эталона в инфракрасном спектральном диапазоне.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К главным результатам работы следует отнести разработку опытного образца аппаратно-программного комплекса «СПЕКТР», на котором выполнены спектрально-текстурные исследования ряда пищевых продуктов.

Комплекс содержит датчик ТВ-сигнала в виде ч/б телевизионной камеры на основе ПЗС-матрицы, осветительную головку с четырьмя группами светодиодов, объектив, видеопроцессор с 12-ти битным АЦП, персональный компьютер и программное обеспечение.

В основу работы комплекса положена активная телевизионная многозональная съемка. В качестве источников света, излучающих в узких спектральных диапазонах, используются люминесцентные светодиоды. Такой подход значительно упрощает техническую реализацию прибора, уменьшает затраты на его разработку, снижает его стоимость и эксплуатационные расходы.

В процессе исследований:

1. Были разработаны простые и эффективные алгоритмы обработки получаемых данных, а также программное обеспечение, которое позволяет оперативно строить лепестковые диаграммы и гистограммы спектральных коэффициентов отражения исследуемых объектов и сравнивать их с данными эталонов. Все программы обработки имеют дружественный интерфейс и позволяют получать результаты в оперативном режиме.

2. Предложен алгоритм определения меры сходства между исследуемым образцом и эталоном в различных спектральных диапазонах.

3. Проведено тестирование работы комплекса на примере сравнения относительных спектральных коэффициентов отражения соевой муки двух разных производителей, которое наглядно показывает их различие. Получены гистограммы относительных спектральных коэффициентов отражения текстур образцов соевой муки при меридиональной и сагиттальной поляризации отраженных от образца и эталона световых потоков в различных спектральных диапазонах. Различие таких гистограмм при поляризации отраженного света проявляется гораздо сильнее, чем при исследовании объектов в обычном, не поляризованном свете.

Таким образом, предлагаемый метод и аппаратура спектрально-текстурного экспресс-контроля пищевых сред характеризуется следующими положительными качествами:

- ★ метод прост и доступен для широкого применения;
- ★ метод оперативен;
- ★ метод позволяет сравнивать исследуемый образец с эталоном по набору параметров (цвет, текстура, поляризация), дающих полное представление о различиях образца от эталона;
- ★ метод позволяет исследовать как твердые среды (на отражение), так и жидкие пищевые среды (на пропускание).
- ★ предлагаемая аппаратура компактна, проста и недорога в изготовлении. Она может быть размещена в обычном кейсе, что позволяет использовать устройство для анализа пищевых сред в «полевых» условиях.

Конечно, комплекс не может заменить существующие методы и аппаратуру оценки качества пищевых сред (такая задача и не ставилась), однако он позволяет их существенно дополнить.

Эксперименты также выявили ряд недостатков разработанного опытного образца прибора, которые должны быть устранены на следующем этапе работы с ним. Рассмотрим их более подробно.

В приборе использован обычный фотографический объектив, не рассчитанный на работу в инфракрасном диапазоне ($\lambda=0,875$ мкм). Вследствие этого в указанном диапазоне возникла необходимость дополнительной фокусировки изображения. По-видимому, необходимо выполнить дополнительные исследования с целью подбора объектива, способного одинаково хорошо работать в видимой и ближней инфракрасной областях спектра.

Кроме того, выяснена необходимость доработки светодиодов (матирование) для достижения более полного рассеяния светового потока.

Телевизионное изображение в приборе формируется с помощью недорогой черно/белой видеокамеры «WAT-902B» фирмы «Watek» (Japan), которая предназначена для использования в охранных системах. Чувствительность камеры составляет 0,01 лк при отношении сигнал/шум 50 dB. Эксперименты показа-

ли, что при исследовании мелкоструктурных объектов желательно иметь более высокое отношение сигнал/шум.

В процессе проведения экспериментов было опробовано два варианта ввода телевизионного сигнала в ЭВМ: с помощью видеопроцессора RT-822VP с 8-ми битным АЦП и с помощью видеопроцессора RT-851VP с 12-ти битным АЦП. Оба разработаны компанией «Растр Технолоджи» (РФ). Первый из указанных видеопроцессоров достаточно дешёв, прост и надежен в работе и имеет минимально необходимый набор программируемых регулировок, что является его несомненным достоинством. Недостаток процессора состоит в малом числе уровней сигнала (256 уровней). Второй видеопроцессор, позволяющий получить 4096 уровней сигнала, имеет неоправданно много программируемых регулировок, нечеткую привязку уровня черного в сигнале и поэтому неудобен в работе. По-видимому, при дальнейшей работе следует предложить компании «Растр Технолоджи» разработку специализированного видеопроцессора для установки «СПЕКТР».

По мнению авторов, представленные в настоящей работе результаты убедительно свидетельствуют о возможности и целесообразности спектрональных исследований отражательной способности и параметров текстуры продуктов питания. Подобные исследования, ранее нашедшие применение в дистанционных зондированиях Земли, могут органически вписаться в концепцию компьютерной квалиметрии пищевых и биологических сред.

7. ЛИТЕРАТУРА

1. Семенова Е. Снижаем градус. «Аргументы и факты» №47, 2007 г. С. 20.
2. Электронный язык. Домашний компьютер, №3, 2002 г.
3. Кантере В.М., Матисон В.А., Фоменко М.А. Сенсорный анализ продуктов питания. – М.: Типография РАСХН, 2003. С.400
4. Кантере В.М., Матисон В.А., Фоменко М.А. и др. Органолептический анализ пищевых продуктов. Монография. – М.: Издательский комплекс МГУПП, 2001. – 151 с.

5. *Родина Т.Г.* Сенсорный анализ продовольственных товаров. Учебник для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 208 с.
6. *Краснова Н.А., Худякова И.В., Яньков В.Ю.* Повышение достоверности оценивания качества органолептического анализа продовольственных товаров на основе модульной балльно-рейтинговой технологии. // Аналитические методы измерения и приборы в пищевой промышленности. Материалы Международной конференции 1 ÷ 2 февраля 2005 г. – М.: Издательский комплекс МГУПП, 2005. – с. 137 ÷ 144.
7. *Воробьева А.В., Ефимова Т.В., Краснова Н.А.* Достоверность оценивания качества органолептического анализа ликероводочной продукции. // Производство спирта и ликероводочных изделий. 2005. № 2. – с. 31-32.
8. *Головня Р.В., Еникеева Н.Г.* Сенсорный анализ для организации контроля качества традиционных и новых пищевых продуктов // Современные методы анализа пищевых продуктов. – М: Наука, 1987. – 268 с
9. *Тавер Е.И.* Экспертный метод потребительской оценки качества продукции. // Стандарты и качество, 1998, № 11, с. 44 ÷ 46.
10. Успехи хроматографии. – М.: Наука, 1972. 296 с.
11. *Митрука Б.М.* Применение газовой хроматографии в микробиологии и медицине. /Пер. с англ. – М.: Медицина, 1978. 600 с
12. *Рогов И.А.* (редактор). Электрофизические, оптические и акустические характеристики пищевых продуктов. Справочник. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 288 с.
13. *Колеснов А.Ю.* Идентификация и анализ качества соков и напитков с применением ферментативных методов. – Л.: ЛТИХП, 2000. 41 с.
14. *Кириллов В.В., Макашева И.Е., Покровская М.В.* Спектральные методы анализа, используемые в пищевой промышленности. Текст лекций / Под ред. Н.П. Новоселова, В.В. Кириллова. – Л.: ЛТИХП, 1990. 42 с.
15. *Темперли Г., Роулинсон Дж., Рашбрук Дж.* (ред.). Физика простых жидкостей. Статистическая теория. /Пер. с английского. - М.: Мир, 1992. 686 с.
16. *Бриллиантов Н.В., Ревокатов О.П.* Молекулярная динамика неупорядочен-

ных сред. Учебное пособие. - М.: МГУ, 1996. 160 с.

17. *Краснов А.Е., Тырсин Ю.А.* Концепция «Технология компьютерной квалитметрии для управления качеством пищевых сред». МГТА. 2002 г.
18. *Яхно Т.А., Яхно В.Г., Санин А.Г., Санина О.А., Пелюшенко А.С., Усватов В.А., Кутяйкин В.Г.* «Высыхающая капля» - новая технология интегральной оценки качества жидких продуктов. Партнеры и конкуренты. №4. 2003. с.29-33.
19. *Михайлов В.Я.* Фотография и аэрофотография. Изд. геодезич. и картографич. литературы. 1952.
20. *Иорданский А.Н.* Спектрональная фотография. Труды ЦНИИ геодезии, аэросъемки и картографии. 1955. Вып. 107.
21. Союз 22 исследует Землю. Совместное издание АН СССР и АН ГДР. М.: Наука, 1980. С. 234.
22. *Дроханов А.Н.* Анализатор структуры аэрокосмических фотоизображений. Журнал Геодезия и картография. №5. 1998 г., с.39-44.
23. Техническая документация и руководство пользователя на видеопроцессоры серии RT-8xxVP. ООО «РАСТР ТЕХНОЛОДЖИ». 2008 г. Москва.
www.rastr.net
24. *Бондаренко А. В., Докучаев И.В., Стешенко В.Б.* Аппаратная реализация систем ввода, обработки, хранения и вывода изображений различных телевизионных форматов и стандартов. Журнал ЦОС № 1, 2003 г., с. 27.
25. *Бондаренко А.В., Докучаев И. В., Князев М.Г.* Расчёт пороговых значений потока излучений и освещённости для ПЗС матриц Kodak KAI-1003M, KAI-1020M и Philips FTF-3020M. Журнал CCTV focus, № 4, 2006 г., с. 24.