

ВЫБОР ИСТОЧНИКОВ ОСВЕЩЕНИЯ ПРИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОМ КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА ФРУКТОВ

А. А. Жиркова, П. В. Балабанов, А. Г. Дивин

*Кафедра «Мехатроника и технологические измерения», miti@tstu.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: гиперспектральная камера; инфракрасное излучение; люминесценция; оптико-электронный контроль; система технического зрения; спектр; ультрафиолетовое излучение; фрукты.

Аннотация: Проведен анализ спектра излучения различных источников, применяемых в системах технического зрения. Даны рекомендации по выбору вида источника для задач оптического контроля в области ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектров излучения.

Исследование источников подсветки при оптико-электронном контроле плодов фруктовых деревьев и ягод является актуальной задачей. Это объясняется тем, что от спектра, интенсивности и направления излучения источников во многом зависит эффективность оптических систем контроля формы, размера, текстуры и цвета поверхности плодов, транспортируемых на конвейере в процессе промышленной сортировки.

В настоящее время известны методы оптико-электронного контроля фруктов, предусматривающие воздействие на растительные ткани излучением ультрафиолетового (УФ), видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов. Использование того или иного излучения определяется поставленными задачами и целями контроля. Наиболее известным является люминесцентный контроль качества растительных тканей, основанный на визуальной регистрации параметров эмиссионного излучения, зависящих от вида растительных тканей плодов, наличия фитозаболеваний. Например, известно, что по цвету люминесценции здоровой растительной ткани картофеля можно определить его сорт, а также начальные стадии его заболевания фитофторой, наличие невидимых человеку различных видов плесени и грибковых заболеваний на citrusовых [1].

Авторами исследования [2] предложен метод спектроскопии флуоресценции, индуцированной УФ-излучением от светодиодного источника, позволяющий определять свежесть и качество яблок. Для быстрого измерения спектров флуоресценции яблок представлена компактная и автоматическая система на основе мехатронного модуля с шаговым двигателем, позволяющая сканировать поверхность яблока при его вращении (рис. 1).

Излучение от светодиодов с длиной волны 375 нм и мощностью 20 мВт воздействовало на поверхность вращающегося яблока, а оптический анализатор спектра (OSA, USB2000, Ocean Optics Inc., Dunedin) регистрировал спектрограмму отраженного от поверхности света в диапазоне длин волн 400...850 нм. Исследования проводились на 1, 6, 11, 18, 24 и 29 дни хранения яблока. В результате оказалось, что нормализованная интенсивность отраженного от поверхности яблока

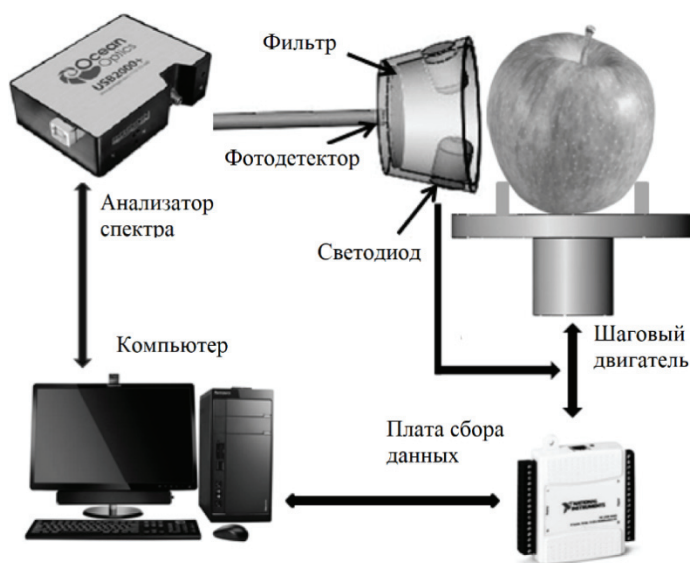


Рис. 1. Установка для определения качества яблок методом флуоресценции

эмиссионного излучения в диапазоне 500...750 нм зависит от срока хранения плода с коэффициентом корреляции 0,95. При этом для построения прогностической модели между сигналами флуоресценции и соответствующими фактическими качествами яблок использован метод частичной регрессии наименьших квадратов. На основании результатов исследования сделан вывод, что метод спектроскопии флуоресценции, индуцированный светодиодом, является эффективным, удобным и перспективным для сканирования яблок и, возможно, других продуктов питания.

Для возбуждения эмиссионного излучения в работе [3] использована портативная рентгеновская флуоресценция (XRF), результаты применения которой показали значительные корреляции между ручными рентгеновскими измерениями кальция и калия и концентрациями, определенными с помощью лабораторного анализа MP-AES. Коэффициенты корреляции Пирсона при этом варьировались в пределах 0,73...0,97.

Авторами исследования [4] обнаружена отрицательная корреляция между содержанием сахара в яблоках и флуоресценцией хлорофилла в дальней красной полосе спектра, что также делает возможным применение метода люминесцентного контроля для определения качества яблок при их созревании. В работе [5] показана возможность использования люминесцентного метода для определения ушибов растительных тканей яблок.

Интересные результаты получены в работе [6], где рассмотрены сравнительные исследования люминесцентного метода и термографии. В этом случае изучались листья яблонь, размещенные на белом листе бумаги и освещенные при помощи светодиодных панелей, максимум спектральной светимости которых наблюдался на длинах волн 455 и 618 нм. Исследования показали преимущества тепловизионной визуализации по сравнению с флуоресцентной для обнаружения и количественной оценки наличия парши яблони на поверхности листьев. Ожидается, что данный метод может быть эффективен и для контроля парши яблок.

В последнее время активно развиваются системы технического зрения контроля качества яблок и других фруктов в области видимого излучения, которые также требуют подсветки плодов. В этом случае тоже необходимо обеспечить равномерное освещение объекта без бликов и теней. Для решения данной

проблемы авторы работы [7] предлагают метод получения и обработки цветных изображений фруктов с нескольких видеокамер при разнонаправленных импульсных источниках освещения, синхронизированных с видеокамерами по скорости видеопотока. Результаты экспериментов с восемью импульсными источниками освещения подтвердили увеличение контрастности изображения в 2 раза по сравнению с традиционным вариантом, когда используются два источника.

Оптические методы применимы не только для крупных овощей и фруктов, но также и мелких ягод, включая клубнику и чернику, которые являются широко потребляемыми фруктами с большой экономической ценностью благодаря их характерному вкусу и внешнему виду, а также потенциальной пользе для здоровья. Для контроля качества ягод используются визуальная спектроскопия, система компьютерного зрения, гиперспектральная визуализация, мультиспектральная визуализация, лазерно-индуцированный метод и тепловизионное изображение, а также их применение для контроля качества и безопасности мелких ягодных плодов [8].

Растительные ткани яблок содержат до 80 % воды. Потеря воды вызывает увядание яблока, что можно обнаружить на полосах поглощения воды, центр одной из которых находится на длине волны 950 нм. Поэтому система подсветки должна обеспечивать воздействие на объект контроля излучением ближнего ИК-диапазона.

Таким образом, анализ методов и источников подсветки при оптико-электронном контроле качества фруктов показал, что для повышения эффективности контроля следует выполнить требования:

- равномерность интенсивности излучения по длине волны в диапазоне 350...1000 нм;
- метод и средства подсветки должны обеспечивать отсутствие бликов и теней в пределах поля зрения видеокамер;
- для возбуждения флуоресценции необходимо воздействие УФ-источником;
- для контроля влаги требуется оптическое воздействие в ближнем диапазоне ИК-излучения.

Для проверки соответствия источников излучения указанным требованиям проведены исследования спектра излучения следующих образцов: 1) галогенная лампа R7S Navigator Osram, 75W, 2900 K; 2) светодиодная лампа Camelion LED E14 4500 K, 5W; 3) натриевая лампа ДНаТ 100W, E40; 4) ксеноновая лампа Osram XENARC ORIGINAL D2S 66240 35W; 5) ИК-лампа Microlight IR Plate-3-950, 10W; 6) металлогалогенная лампа МГЛ 70 W CDM-TD 70/942 RX7s. Измерение спектра излучения осуществлялось камерой Specim FX10 разрешением 2,3 нм в диапазоне 400...1000 нм.

Анализ полученных спектров излучения показывает, что требованию равномерности интенсивности излучения в большинстве случаев удовлетворяют галогеновые лампы. Например, на рис. 2 показан спектр излучения галогеновой лампы типа R7S Navigator Osram, полученный с помощью камеры Specim FX10.

Спектр галогеновых ламп более равномерен в видимом диапазоне, однако на краях диапазона 400...1000 нм наблюдается недостаточный уровень интенсивности. Это требует использования дополнительных источников освещения для обеспечения подсветки на длинах волн 370...450 нм, а также на длинах волн 900..1000 нм. Использование дополнительной подсветки в первом из указанных диапазонов обеспечивает возможность проведения люминесцентного контроля. В качестве источников подсветки использованы люминесцентные лампы типа ЛУФТ, в которых люминофор ФЛ-370 преобразует УФ-излучение ртутного ряда диапазона 253,7 нм в более длинноволновый диапазон УФ-А с максимумом спектральной светимости на 370 нм (рис. 3). Аналогичный спектр имеют также излучатели на базе светодиодов VLMU3510-365-130, которые более экономичны и имеют меньшие размеры.

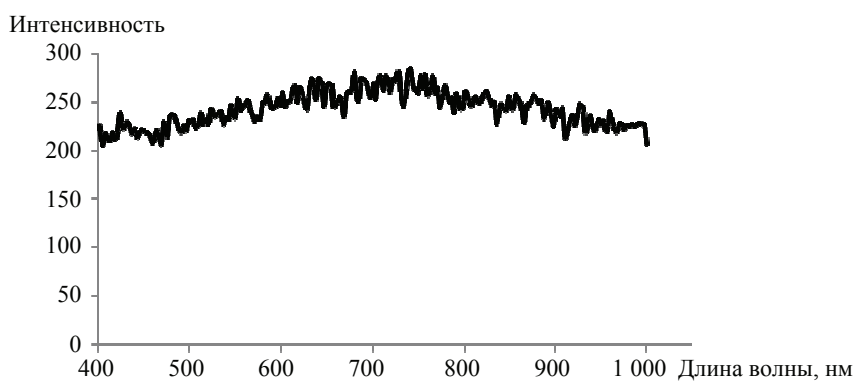


Рис. 2. Спектр лампы R7S Navigator Osram, 75W, 2900 K

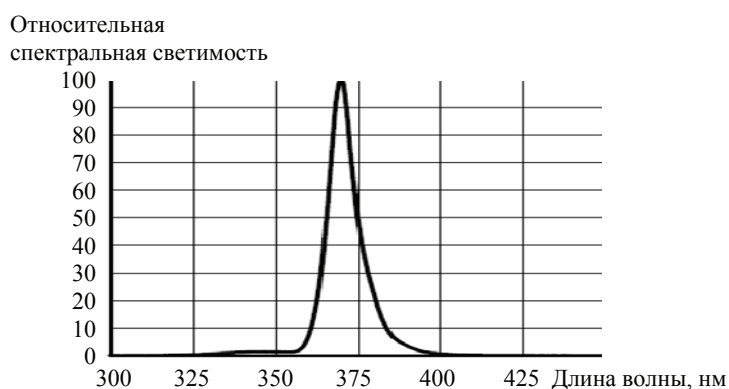


Рис. 3. Спектр люминесцентной лампы ЛУФТ и светодиода VLMU3510-365-130 [9]

Для подсветки в ближнем ИК-диапазоне использовали источники ИК на базе лампы Microlight IR Plate-3-950, 10W (рис. 4).

Выбранные источники освещения удовлетворяют сформулированным требованиям о равномерности интенсивности излучения в диапазоне 350...1000 нм. Также выполнены работы по модернизации макета роботизированного сортировочного комплекса для фруктов, разработанного в ходе проведенных ранее прикладных научных исследований (проект № RFMEFI60419X0240) (рис. 5). В процессе модернизации установлены выбранные источники УФ (светодиоды VLMU3510-365-130), видимого (галогенные лампы Osram XENARC ORIGINAL D2S 66240 35W) и ИК-диапазонов (лампа Microlight IR Plate-3-950) спектра излучения.

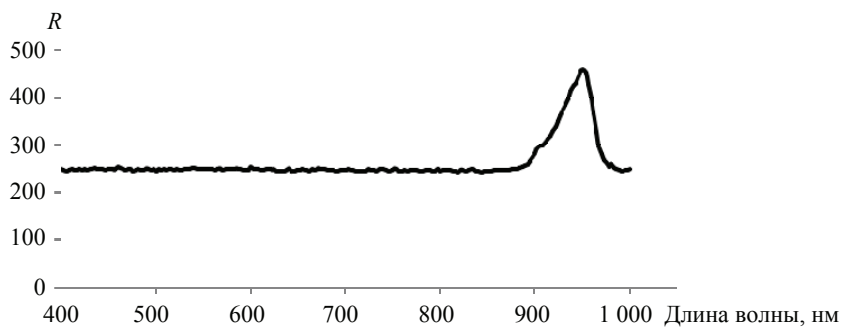


Рис. 4. Спектр лампы Microlight IR Plate-3-950, 10W

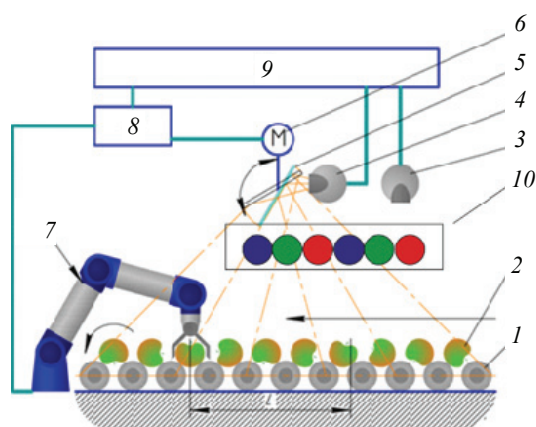


Рис. 5. Макет роботизированного сортировочного комплекса

Источники размещены в линейках 10, расположенных слева и справа от конвейера 1 с движущимися на нем объектами контроля 2 (яблоками, грушами или другими фруктами). Источники включают чередующиеся излучатели разных диапазонов длин волн. Модернизация расширила функциональные возможности стенда в части проведения люминесцентного оптического контроля, а также контроля тургора кожицы фруктов или уровня влаги в растительных тканях.

Дальнейшие задачи состоят в модернизации системы сканирования поверхности яблок, образованной зеркалом 5, приводом 6 путем разработки программного обеспечения контроллера 8 и компьютера 9, что позволит реализовать слежение за объектами контроля в процессе их перемещения по конвейеру. Также существует необходимость модернизации системы отбраковки на основе роботаманипулятора 7, для повышения производительности линии до 700 кг яблок в час. Принятые меры направлены на увеличение эффективности системы технического зрения на основе гиперспектральной камеры 3 и камеры видимого диапазона 4.

Работа по исследованию и выбору источников освещения при оптико-электронном контроле яблок выполнена при поддержке РФФИ, грант № 20-38-90235.

Список литературы

1. Гиренко, В. Н. Люминесцентный анализ картофеля, овощей, плодов и других товаров / В. Н. Гиренко, М. И. Голланд. – М. : Госторгиздат, 1954. – 56 с.
2. LED-induced Fluorescence Spectroscopy Technique for Apple Freshness and Quality Detection / F. Gao, Y. Dong, W. Xiao [et al.] // *Postharvest Biology and Technology*. – 2016. – Vol. 119. – P. 27 – 32. doi: 10.1016/j.postharvbio.2016.04.020
3. Kalcsits, L. A. Non-destructive Measurement of Calcium and Potassium in Apple and Pear Using Handheld X-Ray Fluorescence / L. A. Kalcsits // *Frontiers in Plant Science*. – 2016. – Vol. 7, No. APR2016. – P. 1 – 8. doi: 10.3389/fpls.2016.00442
4. Non-destructive Evaluation of Ripening and Quality Traits in Apples Using a Multiparametric Fluorescence Sensor / D. L. Betemps, J. C. Fachinello, S. P. Galarça [et al.] // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. – 2012. – Vol. 92, No. 9. – P. 1855 – 1864. doi: 10.1002/jsfa.5552

5. Automated Detection of Mechanically Induced Bruise Areas in Golden Delicious Apples Using Fluorescence Imagery / Y. C. Chiu, X. L. Chou, T. E. Grift, M. T. Chen // Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers). – 2015. – Vol. 58, No. 2. – P. 215 – 225. doi: 10.13031/trans.58.10578

6. Thermography Versus Chlorophyll Fluorescence Imaging for Detection and Quantification of Apple Scab / É. Belin, D. Rousseau, T. Boureau, V. Caffier // Computers and Electronics in Agriculture. – 2013. – Vol. 90. – P. 159 – 163. doi: 10.1016/j.compag.2012.09.014

7. Increasing the Reliability of Decision Making by Improving the Characteristics of Optoelectronic Channels Ensuring the Separation of Complex Shape Fruit / B. M. Dinh, A. N. Timofeev, I. A. Konyakhin, V. V. Korotaev // Smart Electromechanical Systems. – Springer, 2021. – P. 229 – 240.

8. Optical Non-Destructive Techniques for Small Berry Fruits: A Review / S. Li, H. Luo, M.-H. Hu [et al.] // Artificial Intelligence in Agriculture. – 2019. – Vol. 2. – P. 85 – 98. doi: 10.1016/j.aiaa.2019.07.002

9. UV SMD LED with Silicone Lens : техническая документация. – Текст : электронный // Vishay Semiconductors. – 12 апреля 2016. – URL : <https://static.chipdip.ru/lib/355/DOC004355472.pdf> (дата обращения: 28.09.2021).

Selecting Lighting Sources with Optical-Electronic Control of Fruit Quality

A. A. Zhirkova, P. V. Balabanov, A. G. Divin

*Department of Mechatronics and Technological Measurements,
miti@tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: hyperspectral camera; infrared radiation; luminescence; optical-electronic control; technical vision system; range; ultraviolet radiation; fruit.

Abstract: The analysis of the radiation spectrum of various sources used in technical vision systems is carried out. Recommendations are given on the choice of the type of source for problems of optical control in the ultraviolet, visible and near infrared ranges of radiation spectra.

References

1. Girenko V.N., Golland M.I. *Lyuminescentnyy analiz kartofelya, ovoshchey, plodov i drugikh tovarov* [Luminescent analysis of potatoes, vegetables, fruits and other goods], Moscow: Gostorgizdat, 1954, 56 p. (In Russ.)

2. Gao F., Dong Y., Xiao W. [et al.] LED-induced Fluorescence Spectroscopy Technique for Apple Freshness and Quality Detection, *Postharvest Biology and Technology*, 2016, vol. 119, pp. 27-32, doi: 10.1016/j.postharvbio.2016.04.020

3. Kalcsits L.A. Non-destructive Measurement of Calcium and Potassium in Apple and Pear Using Handheld X-Ray Fluorescence, *Frontiers in Plant Science*, 2016, vol. 7, no. APR2016, pp. 1-8, doi: 10.3389/fpls.2016.00442

4. Betemps D.L., Fachinello J.C., Galarça S.P. [et al.] Non-destructive Evaluation of Ripening and Quality Traits in Apples Using a Multiparametric Fluorescence Sensor, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2012, vol. 92, no. 9, pp. 1855-1864, doi: 10.1002/jsfa.5552

5. Chiu Y.C., Chou X.L., Grift T.E., Chen M.T. Automated Detection of Mechanically Induced Bruise Areas in Golden Delicious Apples Using Fluorescence Imagery, *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*, 2015, vol. 58, no. 2, pp. 215-225, doi: 10.13031/trans.58.10578

6. Belin É., Rousseau D., Boureau T., Caffier V. Thermography Versus Chlorophyll Fluorescence Imaging for Detection and Quantification of Apple Scab, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, vol. 90, pp. 159-163, doi: 10.1016/j.compag.2012.09.014

7. Dinh B.M., Timofeev A.N., Konyakhin I.A., Korotaev V.V. *Smart Electromechanical Systems*, Springer, 2021, pp. 229-240.

8. Li S., Luo H., Hu M.-H. [et al.] Optical Non-Destructive Techniques for Small Berry Fruits: A Review, *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2019, vol. 2, pp. 85-98, doi: 10.1016/j.aiaa.2019.07.002

9. <https://static.chipdip.ru/lib/355/DOC004355472.pdf> (accessed 28 September 2021).

Auswahl von Beleuchtungsquellen bei der optisch-elektronischen Kontrolle der Fruchtqualität

Zusammenfassung: Die Analyse des Spektrums der Strahlung verschiedener Quellen, die in den Systemen der technischen Sehkraft verwendet werden, ist durchgeführt. Es sind Empfehlungen für die Auswahl der Art der Quelle für die Aufgaben der optischen Kontrolle im Bereich der ultravioletten, sichtbaren und nahen Infrarot-Spektren der Strahlung gegeben.

Choix des sources d'éclairage pour le contrôle optoélectronique de la qualité des fruits

Résumé: Est effectuée une analyse du spectre du rayonnement des différentes sources utilisées dans les systèmes de vision technique. Sont données des recommandations sur le choix du type de la source pour les tâches du contrôle optique dans les domaines des spectres de rayonnement ultraviolet, visible et proche infrarouge.

Авторы: *Жиркова Александра Александровна* – аспирант кафедры «Мехатроника и технологические измерения»; *Балабанов Павел Владимирович* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Мехатроника и технологические измерения»; *Дивин Александр Георгиевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Мехатроника и технологические измерения», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Мищенко Сергей Владимирович* – доктор технических наук, профессор, советник при ректорате, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.