

EDN: BRFXTY

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-43-50



Научная статья

УДК 631.343



Оптимизация параметров освещения в процессе съемки модуля оптической идентификации

Андрей Дмитриевич Чиликин,
аспирант, научный сотрудник,
e-mail: gwinnyandrei@yandex.ru;

Дмитрий Олегович Хорт,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: dmitrihort@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Гиперспектральный анализ представляет собой неинвазивный метод, способствующий снижению потерь и повышению качества плодов за счет эффективной идентификации дефектов при сортировке. Ключевым условием получения достоверных данных является стабильное и равномерное освещение, обеспечиваемое специализированными источниками с контролируемым спектром. Интеграция таких систем в автоматизированные линии снижает влияние человеческого фактора, повышает производительность и способствует устойчивому развитию аграрного сектора. (*Цель исследования*) Обосновать параметры гиперспектрометра и источника света в системе освещения. (*Материалы и методы*) Использовали модуль оптической идентификации, представляющий собой систему из шаговых двигателей, реечных и винтовых передач с подшипниками, стол с резиновыми валиками, скорость которых регулируется с помощью трехфазного двигателя, запитанного через частотный преобразователь. Подвеска стенда может перемещаться горизонтально и вертикально с заданной скоростью. Для сбора и обработки информации во время сканирования использовались программы *SpecGrabber* и *CubeCreator*, благодаря чему в дальнейшем полученные снимки возможно было анализировать в программе *Gelion*. (*Результаты и обсуждение*) Выбран гиперспектрометр в модуле идентификации. Определены основные источники света в системе освещения. (*Выводы*) Мощность светового потока, полученная в результате расчетов и равная 934 ватта на квадратный метр, соответствует чувствительности *CMOS*-детектора от 100-1500 ватт на квадратный метр, Это значит, что камера сможет фиксировать гиперспектральные данные при заданных экспозиции и освещенности. Для системы освещения в модуле необходимо установить четыре галогеновые лампы, что соответствует уровню освещенности 3010 люксов. При данном уровне освещенности были получены достоверные графики спектра здоровой и пораженной болезнью областей, а также низкий показатель экспозиции кадра спектрометра 2,1 миллисекунды, что повлияло на время сканирование, которое оказалось менее, чем 2 секунды.

Ключевые слова: гиперспектральная съемка, гиперспектрометр, спектральный анализ, система освещения, источники света, галогенные лампы, спектральная калибровка, сортировка фруктов.

■ **Для цитирования:** Чиликин А.Д., Хорт Д.О. Оптимизация параметров освещения в процессе съемки модуля оптической идентификации // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №3. С. 43-50. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-43-50. EDN: BRFXTY.

Scientific article

Optimization of Lighting Parameters for Imaging with the Optical Identification Module

Andrey D. Chilikin,
Ph.D. student (Eng.), researcher,
e-mail: gwinnyandrei@yandex.ru;

Dmitry O. Hort,
Dr.Sc.(Eng.), chief researcher;
e-mail: dmitrihort@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Hyperspectral analysis is a non-invasive method that reduces losses and improves fruit quality by accurately identifying defects during sorting. A key requirement for obtaining reliable data is stable, uniform illumination provided by specialized light sources with a controlled spectrum. The integration of such systems into automated production lines minimizes human error, increases productivity, and supports the sustainable development of the agricultural sector. (*Research purpose*) The study aims to substantiate the selection of parameters for the hyperspectrometer and the light source within the illumination system.

(*Materials and methods*) The optical identification module used in this study consists of stepper motors, rack-and-pinion and screw drives with bearings, and a platform with rubber rollers, the speed of which is regulated by a three-phase motor powered through a frequency converter. The stand suspension can move both horizontally and vertically at a preset speed. SpecGrabber and CubeCreator software was used to collect and process data during scanning, enabling subsequent image analysis using Gelion software. (*Results and discussion*) A hyperspectrometer was selected for the identification module, and the main light sources for the illumination system were determined. (*Conclusions*) The calculated luminous flux is 934 watts per square meter, which falls within the sensitivity range of 100–1500 watts per square meter for the Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) detector. This confirms that the camera can capture hyperspectral data under the specified exposure and illumination conditions. It was determined that four halogen lamps should be installed in the illumination module, providing an illuminance level of 3010 lux. At this lighting level, reliable spectral graphs were obtained for both healthy and diseased fruit areas. Additionally, the short exposure time of 2.1 milliseconds per spectrometer frame resulted in a total scanning time of less than 2 seconds.

Keywords: hyperspectral imaging, hyperspectrometer, spectral analysis, illumination system, light sources, halogen lamps, spectral calibration, fruit sorting

■ **For citation:** Chilikin A.D., Hort D.O. Optimization of lighting parameters for imaging with the optical identification module. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N3. 43-50 (In English). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-43-50. EDN: BRFXTY.

Процесс сортирования фруктов по качественным характеристикам представляет собой один из наиболее значимых этапов послеуборочной обработки продукции. Перед отправкой на хранение или реализацию плоды и овощи подвергаются обязательной сортировке, что позволяет своевременно устранить дефектные экземпляры, выявить несоответствующие стандартам фрукты по размеру, а также обнаружить повреждения, вызванные фитопатологическими заболеваниями или механическим воздействием. Внешние дефекты, такие как вмятины, ожоги и деформации, существенно ухудшают товарный вид продукции и негативно влияют на сроки хранения [1]. Одной из приоритетных задач в данном процессе является разработка методов точного распознавания различных видов повреждений, полученных плодами в процессе сбора и транспортировки [2]. Дополнительно необходимо учитывать физическую и биологическую изменчивость плодов, что усложняет процесс их классификации.

Анализ практического опыта отечественной промышленности и зарубежных исследований свидетельствует о высокой эффективности применения оптико-электронных систем управления, а также технического зрения, работающего в диапазоне видимого и ближнего инфракрасного излучения. В целях повышения точности контроля качества плодов все чаще используются технологии гиперспектрального и мультиспектрального анализа, позволяющие детально оценивать их состояние (Курбанов Р.К., и др. Планировщик параметров аэрофотосъемки с мультиспектральной камерой. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024665531, 02.07.2024. Заявка № 2024664098 от 18.06.2024). Для обеспечения корректной работы систем технического зрения, функционирующих в

видимом диапазоне спектра, критически важно организовать эффективную систему освещения [3]. Достигнуть равномерного освещения без появления теней и бликов возможно при использовании источников света с постоянным разнонаправленным потоком, а также импульсных световых источников, синхронизированных с видеокамерами в соответствии с частотой видеопотока [4]. Это позволяет значительно повысить качество получаемых изображений и, как следствие, точность определения характеристик плодов.

Цель исследования: обосновать параметры гиперспектрального модуля и источника света в системе освещения.

Материалы и методы. Для получения гиперспектральных изображений, используемых для классификации и выявления заболеваний и механических повреждений яблок, создан специализированный модуль оптической идентификации (*рис. 1*).

Оптическая система включает в себя гиперспектральную камеру 2, блок управления (ноутбук), платформу (стол) с резиновыми роликами 3 и систему перемещения камеры. Гиперспектральная камера обеспечивает высокую детализацию сканируемого объекта. Он излучает свет с различными длинами волн в инфракрасной области спектра и обладает такими спектроскопическими характеристиками, как отражательная способность и флуоресценция [5].

Как только свет отражается от поверхности объекта, он визуализируется. В зависимости от своего химического состава сканируемый объект по-разному отражает свет, создавая уникальную спектральную характеристику [6]. Затем эта характеристика сравнивается с эталонными данными из базы данных, хранящейся на блоке управления (ноутбуке).

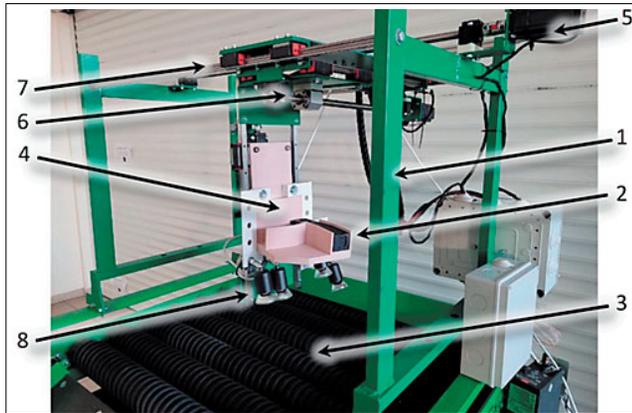


Рис. 1. Система для получения гиперспектральных изображений яблок. 1 – стальной профиль; 2 – гиперспектральная камера; 3 – платформа с резиновыми валиками; 4 – система подвеса камеры; 5, 6 – шаговые электродвигатели; 7 – платформа с каретками; 8 – система освещения

Fig. 1. System for obtaining hyperspectral images of apples: 1 – steel profile; 2 – hyperspectral camera; 3 – platform with rubber rollers; 4 – camera suspension system; 5, 6 – stepper motors; 7 – platform with carriages; 8 – lighting system

Гиперспектральная камера закреплена на подвеске 4, которая может перемещаться с помощью шаговых электродвигателей 5 по направляющим 6 и речным зубчатым передачам 7 вверх-вниз вертикально, вдоль и поперек горизонтально, покрывая всю рабочую поверхность. Шаговые двигатели питаются от сети переменного тока и жестко закреплены на раме 1 сортировочного устройства. Возможность перемещения камеры 2 в горизонтальном и вертикальном направлениях позволяет осуществлять полное сканирование объектов с разных сторон [7]. Система освещения 8 расположена над рабочей поверхностью и необходима для уменьшения экспозиции камеры, а как следствие – сокращение продолжительности сканирования объектов. Благодаря подвижной установке гиперспектральной камеры и системы освещения с микроконтроллером повышаются качество обнаружения микро- и макроповреждений тканей яблок, а также точность классификации объектов при сортировке [8].

Программное обеспечение *SpecGrabber*, разработанное компанией *BaySpec* для управления гиперспектральными камерами серии *OCI™*, обеспечивает захват, обработку и анализ гиперспектральных изображений в реальном времени. Программа позволяет настраивать параметры съемки, такие как экспозиция, скорость сканирования и диапазон длин волн, а также калибровать сенсор для повышения точности получаемых данных. *SpecGrabber* обеспечивает сбор и обработку изображений с высоким пространственным и спектральным разрешением, позволяя синхронизировать процесс съем-

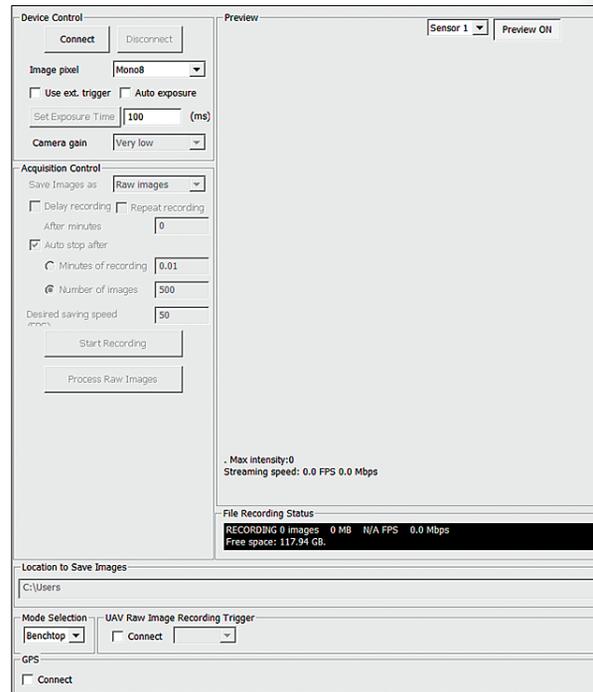


Рис. 2. Главное окно программы *SpecGrabber*
Fig. 2. Main window of the *SpecGrabber* program

ки с внешними устройствами, например, источниками освещения или транспортировочными механизмами. Гиперспектральные кубы данных формируются автоматически и впоследствии используются для спектрального анализа (рис. 2) [9].

Предварительную обработку raw-данных с целью их сборки в гиперкубы производили в программе *BaySpec CubeCreator 2100*. Это программное обеспечение на базе *Microsoft Windows* для обработки необработанных изображений, записанных камерами *BaySpec* в гиперспектральные кубы (рис. 3). Программа позволяет пользователю отображать и проверять белый эталон, темный фон и необработанные изображения. Кроме того, пользователь может использовать программу для просмотра гиперспектральных кубов и полосовых изображений. Это программное обеспечение предназначено для работы под управлением операционных систем *Windows 10* и *Windows 7* [10].

Анализ и обработка гиперспектральных данных, включая разметку зон интереса, просмотр и экспорт спектральных характеристик, а также поканальный спектральный анализ, выполнялись в специализированной программе *Gelion* (рис. 4).

Программа *Gelion* предназначена для обработки данных проксимального зондирования и фенотипирования растений. Она позволяет загружать изображения в различных форматах, включая *ENVI *.hdr*, **.jpg*, **.png* и **.tif*, отображать их в главном окне, а также выполнять масштабирование и вращение изображений. Пользователи могут выделять на изображении различные области интереса, такие

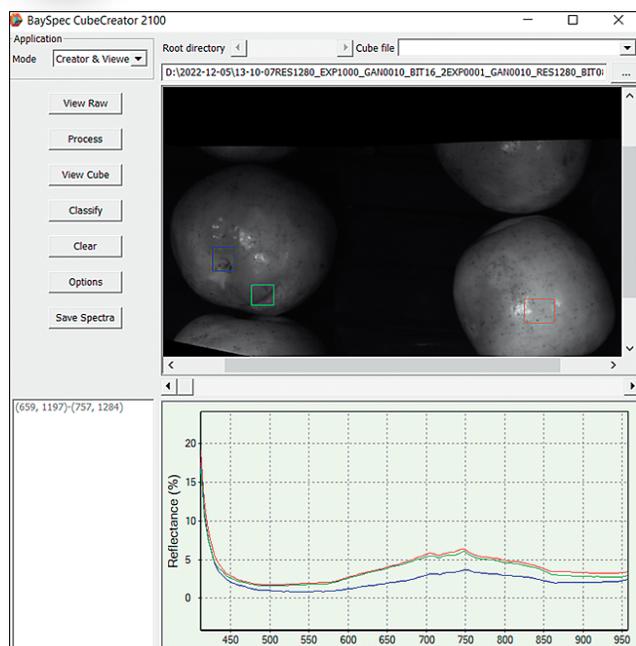


Рис. 3. Формирование гиперкуба с использованием программного обеспечения CubeCreator 2100

Fig. 3. Formation of a hypercube using CubeCreator 2100 software

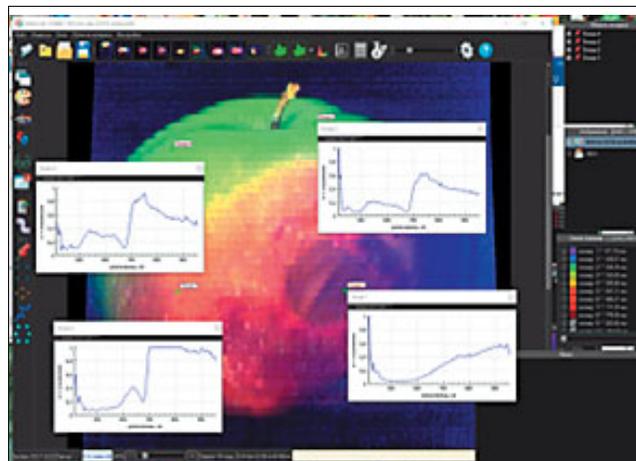


Рис. 4. Гиперкуб биологического объекта в программе Gelion

Fig. 4. Hypercube of a biological object in Gelion software

как точки, прямоугольники, эллипсы, полилинии и полигоны, и отображать спектральные профили этих областей в отдельных окнах просмотра.

Программа предоставляет возможность расчета различных спектральных индексов, как предустановленных, так и заданных пользователем, построения гистограмм этих индексов для всего изображения или выбранных областей. Кроме того, Gelion позволяет создавать тепловые карты спектральных индексов с использованием более 10 различных цветовых шкал, устанавливать пороговые значения для отображения и создавать маски изображений на основе этих индексов [11].

Результаты и обсуждение. Для достижения требуемого уровня линейного сканирования необходимо определить количество энергии, проходящей через определенную площадь поверхности биологического объекта в определенный промежуток времени [12]:

$$D_i = J \cdot t, \quad (1)$$

где J – интенсивность линейного сканирования, Вт/м; t – время облучения, с.

Для определения силы фототока линейного сканирования необходимо определить площадь i -го сечения биологического объекта с упрощенной характеристикой для тела неправильной формы [13]:

$$V_T \approx k_1 \sum_{i=1}^n R_K = \frac{k_2}{2} \sum_{i=1}^n D_K, \quad (2)$$

где R_K, D_K – радиальные и диаметральные размеры биологического объекта, м; k_1 и k_2 – коэффициенты неравномерности радиального и диаметального размера биологического объекта.

Сила фототока линейного сканирования по объему биологического объекта:

$$V_T \approx k_3 \sum_{i=1}^n D_K, \quad (3)$$

где k_3 – коэффициент неравномерности размера объекта, связанный с распределением формы и сканируемого объема; n – число источников линейного сканирования, шт.

Площадь поверхности яблока:

$$S = 4\pi R^2 = 4\pi \cdot (0,04)^2 \approx 0,0201 \text{ м}^2.$$

Для более точного расчета коэффициенты неравномерности k_1, k_2, k_3 следует оценить на основе реальных данных о форме и размерах яблок. В литературе и исследованиях по сортировке плодов можно найти типичные значения этих коэффициентов [14].

Коэффициент неравномерности радиального размера. В зависимости от сорта форма яблок может варьироваться от идеально сферической до сплюсненной или удлинненной. Обычные яблоки имеют колебания радиуса до 10-15%. Принимаем $k_1 \approx 1,1$.

Коэффициент неравномерности диаметального размера. Если яблоко не идеально сферично, его диаметр вдоль разных осей может различаться. В среднем отклонение от среднего диаметра может достигать 8-12%. Принимаем $k_2 \approx 1,08$.

Коэффициент неравномерности, связанный с распределением формы плода и сканируемого объема. Сканер воспринимает яблоко как совокупность поперечных сечений разного размера. Так как некоторые части яблока могут иметь больший или меньший вклад в общий объем, коэффициент учитывает это. Принимаем $k_3 \approx 1,05$.

Сила фототока линейного сканирования по объему биологического объекта:

$$V_T \approx 1,1 \cdot 0,04 + \frac{1,08}{2} \cdot (2 \cdot 0,04) = 0,086 \text{ м}^3.$$

$$V_T \approx k_2 \cdot 0,086 = 0,093 \text{ м}^3.$$

Время облучения

$$t_{\text{скан}} = L_{\text{зрен}} / V_{\text{скан}} \quad (4)$$

где $L_{\text{зрен}}$ – поле зрения камеры, м; $V_{\text{скан}}$ – скорость сканирования, м/с;

$$t_{\text{скан}} = 0,15 : 0,0558 = 2,69 \text{ с.}$$

В системе используются внешние источники освещения, например, LED-панели или галогенные лампы, их мощность и распределение света могут быть указаны в паспорте прибора. Тогда интенсивность можно приблизительно оценить по формуле:

$$J = P / L \text{ Вт/м,} \quad (5)$$

где P – мощность светового потока, Вт; L – ширина освещенной полосы, м.

В системе используются четыре лампы JCDR-35/GU5.3 мощностью по 35 Вт:

$$P_{\text{общ}} = 4 \cdot 35 = 140 \text{ Вт.}$$

Ширина освещенной полосы должна соответствовать полю зрения камеры, так как освещение охватывает сканируемую область. Согласно предыдущим расчетам: $L = 0,15 \text{ м.}$

Интенсивность линейного сканирования:

$$J = 140 / 0,15 = 933,3 \text{ Вт/м.}$$

Количество энергии, проходящей через единицу площади поверхности яблока

$$D_i = 933,3 \cdot 0,0021 = 1,96 \text{ Дж/м}^2.$$

Энергия, проходящая через всю поверхность яблока во время экспозиции камеры:

$$D_{\text{общ}} = D_i \cdot S = 1,96 \cdot 0,021 = 0,0394 \text{ Дж.} \quad (6)$$

Основным инструментом для проведения оптической съемки биологических объектов (плоды яблоки, клубни картофеля) выбран сканирующий гиперспектрометр OCI-F Ultra-Compact Hyperspectral Imager (рис. 5) производства компании BaySpec, Inc.

Для оценки соответствия необходимо сравнить полученное значение энергии с чувствительностью детектора гиперспектральной камеры.

Параметры камеры OCI-F. Спектральный диапазон 600–1000 нм, тип сенсора CMOS чувствительностью от 100–1500 Вт/м² в зависимости от длины волны; оптимальная освещенность сцены от 5000 до 20000 лк; экспозиция настраиваемая от 0,1 до 100 мс.



Рис. 5. Гиперспектрометр OCI-F Ultra-Compact Hyperspectral Imager

Fig. 5. OCI-F Ultra-Compact Hyperspectral Imager

Проверка достаточности энергии для камеры. Для сравнения переведем энергию в мощность на единицу площади:

$$P = \frac{D_{\text{общ}}}{t \cdot S} = \frac{0,0394}{0,0021 \cdot 0,0201} = 934 \text{ Вт/м}^2. \quad (7)$$

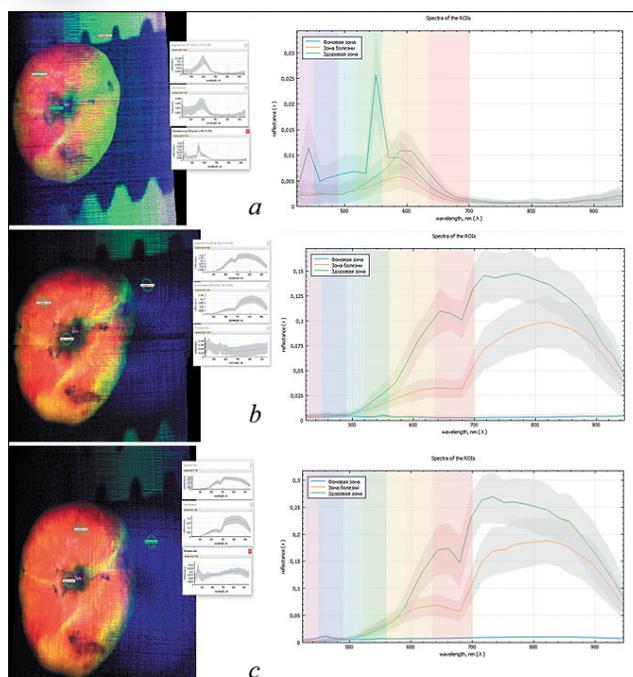
Этот уровень соответствует чувствительности сенсора камеры OCI-F, так как он находится в диапазоне обнаружения. Расчет энергии показывает, что для работы данной камеры света от галогенных ламп достаточно.

На сортировочной установке проведена серия тестированных сканирований с целью получения гиперспектральных снимков при различных условиях освещения яблок: начиная с естественного (без галогенных ламп) и с освещением от одной до четырех галогенных ламп: соответственно 200; 520; 1150; 2890 и 3010 люкс. Были использованы вольфрамовые галогенные лампы Camelion GU10 мощностью по 35 Вт. Результаты сканирования плодов яблони представлены на рисунке 6.

Полученные снимки отличаются качеством изображения и количествами полученных пикселей. Экспозиция кадра гиперспектрометра, которая автоматически варьировалась от 100 до 2,1 мс, выбиралась в зависимости от количества ламп, что значительно влияло на скорость сканирования. Без системы освещения видно, что кадр имеет множество дефектов, был получен не с первого сканирования и за время более 30 с, что характерно для высокой экспозиции кадра (100 мс).

Графики в областях интереса ROI (Region Of Interest), которыми являлись здоровая зона, зона болезни и фон, в варианте *a*, без ламп, не отражают действительные графики, которые характерны для здоровых и болезненных областей яблока [15]. Спектры ненормированные и имеют большой разброс, что видно по прозрачной серой зоне вокруг усредненного спектра.

Аналогичная ситуация в вариантах *b* и *c*, которые были получены не с первых попыток и сканирование заняло до 30 с при экспозиции от 40 до



60 мс. Графики в здоровой области интереса приближены к спектрограммам здорового яблока [16], но все еще с большим разбросом. При сканировании с тремя галогенными лампами (вариант *d*) изображение яблока четкое, без помех и артефактов. Графики практически усредненные, нормированы по максимальному значению. Время сканирования до 5 с и экспозицией 11 мс.

В варианте с использованием всех четырех галогенных ламп (*e*), на спектрограмме виден ряд локальных экстремумов, соответствующих поглощению излучения на определенной длине волны веществом объекта контроля. Известно, что хлорофилл, содержащийся в ткани яблока, имеет максимум поглощения на длине волны 680 нм. Спектрограммы усреднены и нормированы по максимальному значению, что видно по практическому отсутствию серых зон. Время сканирования составило до 2 с при экспозиции 2,1 мс. Изображение выстроено четко с явной областью заболевания в виде солнечного ожога.

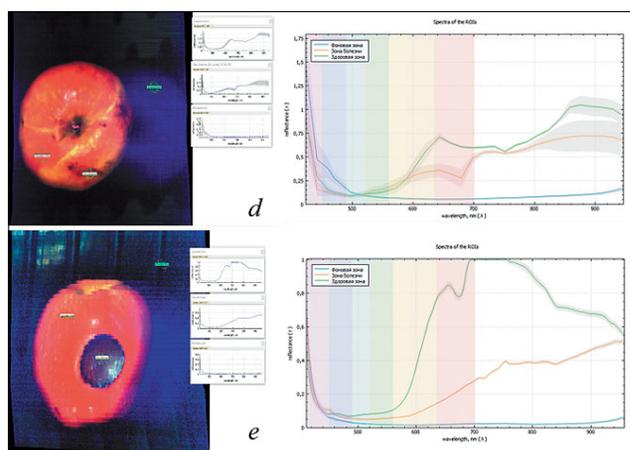


Рис. 6. Результаты сканирования плодов яблоки с различными условиями освещения: *a* – естественно освещение, галогенные лампы отключены, 200 Лк; *b* – включена одна галогенная лампа в системе освещения, 520 Лк; *c* – включены две галогенные лампы, 1150 Лк; *d* – включены три галогенные лампы, 2890 Лк; *e* – включены все галогенные лампы, 3010 Лк

Fig. 6. Results of scanning apple fruits under different lighting conditions: a – natural lighting without halogen lamps; b – one halogen lamp, 520 lx; c – two halogen lamps, 1150 lx; d – three halogen lamps, 2890 lx; e – four halogen lamps, 3010 lx

Выводы. Мощность светового потока, полученная в результате расчетов, равная 934 Вт/м^2 , соответствует чувствительности CMOS-детектора от 100 до 1500 Вт/м^2 . Это означает, что камера сможет фиксировать гиперспектральные данные при заданных экспозиции и освещенности.

В программном обеспечении *Gelion* было установлено, что для системы освещения в модуле необходимо установить четыре галогеновые лампы, что соответствует уровню освещенности 3010 Лк. При данном уровне освещенности получены достоверные графики спектра здоровой и пораженной болезнью областей, а также низкий показатель экспозиции кадра спектрометра 2,1 мс, что повлияло на время сканирование, которое оказалось менее 2 с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курбанов Р.К., Ценч Ю.С., Захарова Н.И. Основные тенденции в развитии технологии аэрофотосъемки сельскохозяйственных угодий // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №1. С. 86-96. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-86-95.
2. Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С., Миронова А.В. и др. Электрический и механический плодосъемники // *Сельский механизатор*. 2023. №5. С. 15. DOI: 10.47336/0131-7393-2023-5-15-21.
3. Бланк В.А., Скиданов Р.В., Досколович Л.Л. Исследование спектральной линзы для формирования вегетационного индекса NDVI 0,705 // *Оптический журнал*. 2022. Т. 89. №3. С. 20-27. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-03-20-27.
4. Коротченя В.М., Ценч Ю.С., Лобачевский Я.П. Разработка типажей сельскохозяйственных технологий для системы машин // *Технический сервис машин*. 2024. Т. 62. С. 136-148. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-4-136-148.
5. Balabanov P.V., Zhirkova A.A., Chugunov M.V. et al. Detection of defects on apples using hyperspectral reflection visualization combining both vegetation index analysis and neural network. *Journal of Physics*. 2020. Vol. 1515. 9. DOI: 10.1088/1742-6596/1515/3/032064.

6. Zhirkova A.A. optoelectronic quality control of apples using methods of multidimensional statistical analysis in the frames of lean manufacturing approach. *Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies*. 2022. Vol. 67. 243-246. DOI: 10.1109/ITQMIS56172.2022.9976708.
7. Drozdov D., Kolomeychenko M., Borisov Y. Supervisory mutual augmentation of spectral sensing and machine learning for non-invasive detection of apple fruit damages. *Horticulturae*. 2023. Vol. 8. 2-13. DOI: 10.3390/horticulturae8121111.
8. Шурыгин Б.М., Смирнов И.Г., Чиликин А.Д. и др. Взаимное дополнение спектрального зондирования и машинного обучения для неинвазивного обнаружения повреждений плодов яблони. *Horticulturae*. 2022. Т. 8. С. 4-12. DOI: 10.3390/horticulturae8121111.
9. Wu A., Zhu Z., Ren T. Detection of apple defect using laser-induced light backscattering imaging and convolutional neural network. *Computers & Electrical Engineering*. 2020. Vol. 81, 4-6. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2019.106454
10. Fan S., Li J., Zhang Y. et al. On line detection of defective apples using computer vision system combined with deep learning methods. *Journal of Food Engineering*. 2020. Vol. 286. 7-12. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110102.
11. Huang Y., Lu R., Chen K. Detection of internal defect of apples by a multichannel Vis/NIR spectroscopic system. *Postharvest Biology and Technology*. 2020. Vol. 161. 7-14. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2019.111065.
12. Tang Z., Chen Z., Li G., Hu Y. Multicolor nitrogen dots for rapid detection of thiram and chlorpyrifos in fruit and vegetable samples. *Analytica Chimica Acta*. 2020. Vol. 1136. 72-81. DOI: 10.1016/j.aca.2020.08.038.
13. Фирсов Н.А., Подлипов В.В., Ивлиев Н.А. и др. Нейросетевая классификация гиперспектральных изображений растительности с формированием обучающей выборки на основе адаптивного вегетационного индекса // *Компьютерная оптика*. 2021. Т. 45 (6). С. 887-896. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1038.
14. Vanoli M., Van Beers R., Sadar N. Time- and spatially-resolved spectroscopy to determine the bulk optical properties of Braeburn apples after ripening in shelf life. *Postharvest Biology and Technology*. 2020. Vol. 168. 5-7. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2020.111233.
15. Ali Shah S., Zeb A., Waqar S. Towards fruit maturity estimation using NIR spectroscopy. *Infrared Physics & Technology*. 2020. Vol. 111. 4-7. DOI: 10.1016/j.infrared.2020.103479.
16. Балабанов П.В., Жиркова А.А., Дивин А.Г. Получение спектрограмм для участков поверхности объектов контроля (яблок), включающих неповрежденную и поврежденную зоны, а также для поверхности конвейера, на котором транспортируются объекты контроля // *Национальная ассоциация ученых*. 2021. N36-2 (63). С. 17-19. EDN: RVHEDR.

REFERENCES

1. Kurbanov R.K., Tsench Yu.S., Zakharova N.I. The main trends in the development of aerial photography technology of agricultural lands. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N1. 86-96. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-86-95.
2. Ahalaya B.Kh., Tsench Yu.S., Mironova A.V. et al. Electric and mechanical fruit pickers. *Selskiy Mehanizator*. 2023. N5. 15-21 (In Russian). DOI: 10.47336/0131-7393-2023-5-15-21.
3. Blank V.A., Skidanov R.V., Doskolovich L.L. Investigation of a spectral lens for the formation of a normalized difference vegetation index NDVI0.705. *Journal of Optical Technology*. 2022. Vol. 89. N3. 20-27. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-03-20-27.
4. Korotchenya V.M., Tsench Yu.S., Lobachevsky Ya.P. Development of types of agricultural technologies for the machine system. *Machinery Technical Service of*. 2024. Vol. 62. N4. 136-148. DOI: 10.22314/2618-8287-2024-62-4-136-148.
5. Balabanov P.V., Zhirkova A.A., Chugunov M.V. et al. Detection of defects on apples using hyperspectral reflection visualization combining both vegetation index analysis and neural network. *Journal of Physics: IOP*. 2020. Vol. 1515 9 (In English). DOI: 10.1088/1742-6596/1515/3/032064.
6. Zhirkova A.A. Optoelectronic quality control of apples using methods of multidimensional statistical analysis in the frames of lean manufacturing approach. *Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies*. 2022. Vol. 67. 243-246 (In English). DOI: 10.1109/ITQMIS56172.2022.9976708.
7. Drozdov D. Supervisory Mutual augmentation of spectral sensing and machine learning for non-invasive detection of apple fruit damages. *Horticulturae*. 2023. Vol. 8. 2-13 (In English). DOI: 10.3390/horticulturae8121111.
8. Shurygin B.M., Smirnov I.G., Chilikin A.D. et al. Complementarity of spectral sensing and machine learning for noninvasive detection of damage to apple trees. *Horticulturae*. 2022. Vol. 8. 4-12 DOI: 10.3390/horticulturae8121111.
9. Wu A., Zhu Z., Ren T. Detection of apple defect using laser-induced light backscattering imaging and convolutional neural network. *Computers & Electrical Engineering*. 2020. Vol. 81. 4-6 (In English). DOI: 10.1016/j.compeleceng.2019.106454.
10. Fan S., Li J., Zhang Y., Tian X., Huang W. On line detection of defective apples using computer vision system combined with deep learning methods. *Journal of Food Engineering*. 2020. Vol. 286. 7-12 (In English). DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110102.
11. Huang Y., Lu R., Chen K. Detection of internal defect of apples by a multichannel Vis/NIR spectroscopic system. *Postharvest Biology and Technology*. 2020. Vol. 161. 7-14 (In English). DOI: 10.1016/j.postharvbio.2019.111065.

12. Tang Z., Chen Z., Li G., Hu Y Multicolor nitrogen dots for rapid detection of thiram and chlorpyrifos in fruit and vegetable samples. *Analytica Chemical Acta*. 2020. Vol. 1136. 72-81 (In English). DOI: 10.1016/j.aca.2020.08.038.
13. Firsov N.A., Podlipnov V.V., Ivliev N.A. et al. Neural network-aided classification of hyperspectral vegetation images with a training sample generated using an adaptive vegetation index. *Computer Optics*. 2021. Vol. 45. №6. 887-896. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1038.
14. Vanoli M., Van Beers R., Sadar N. Time- and spatially-resolved spectroscopy to determine the bulk optical properties of Braeburn apples after ripening in shelf life. *Postharvest Biology and Technology*. 2020. Vol. 168. 5-7 (In English). DOI: 10.1016/j.postharvbio.2020.111233.
15. Ali Shah S., Zeb A., Waqar S. Towards fruit maturity estimation using NIR spectroscopy. *Infrared Physics & Technology*. 2020. Vol. 111. 4-7 (In English). DOI: 10.1016/j.infrared.2020.103479.
16. Balabanov P.V., Divin A.G., Zhirkova A.A. Obtaining spectrograms for the surface areas of the control objects (apples), including intact and damaged zones, as well as for the surface of the conveyor on which the control objects are transported. *National Association of Scientists*. 2021. N36-2 (63). 17-19 (In Russian). EDN: RVHEDR.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Чиликин А.Д. – подготовка текста, анализ литературных данных, подготовка и проведение эксперимента, обработка экспериментальных данных;
Хорт Д.О. – научное руководство, анализ и доработка текста.
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Chilikin A.D. – text preparation, literature review, experiment design and execution, processing of experimental data;
Hort D.O. – scientific supervision, analysis and revision of the text.
The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

27.06.2025
05.08.2025