

DOI: 10.12731/2658-6649-2025-17-1-1041

EDN: EMYEPG

УДК 612.017.1:616.33-02.27



Научная статья

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СВЕЖЕСТИ ПЛОДОВ ЗЕМЛЯНИКИ

*Г.В. Нестеров, А.В. Гурылева, М.О. Шарикова,
С.А. Суханова, А.С. Мачихин*

Аннотация

Обоснование. Плоды земляники являются ценным и востребованным, но скоропортящимся, продуктом питания. Свежесть плодов зависит от времени, прошедшего от момента их сбора, и определяет срок сохранения ими питательной ценности, внешней привлекательности и безопасности для потребителя. Традиционные подходы к оценке состояния плодов отличаются субъективностью, трудоемкостью и низкой производительностью. Настоящая работа посвящена анализу возможности бесконтактной оценки свежести плодов земляники на основе её гиперспектрального анализа.

Материалы и методы. В ходе исследования оценивались спектральные свойства внешней поверхности и внутренней структуры плодов земляники сорта Ремонтантная Елизавета II в течение 26 дней после сбора плодов. Средством измерения служил акустооптический видеоспектрометр видимого и ближнего инфракрасного диапазона. Цифровая обработка данных включала предварительное улучшение спектральных изображений, морфологическую обработку и определение количественной метрики отражательной способности в наиболее информативном спектральном диапазоне длин волн. Статистический анализ основывался на построении регрессионных моделей определения срока после сбора плодов. Модели оценивались по коэффициенту детерминации (R^2), относительной ошибке (RE) и среднеквадратическому отношению (RMSE).

Результаты. Предложен подход к бесконтактной оценке свежести плодов земляники на основе их оптического анализа. Получены математические модели определения срока после сбора плодов земляники Ремонтантная Елизавета II по гиперспектральным изображениям поверхности и внутренней структуры образцов. Показано, что анализ спектральных свойств внешней поверхности

плодов обеспечивает более высокую точность определения срока после сбора плодов и позволяет достичь $R^2 = 0.96$, $RE = 22.78\%$ и $RMSE = 1.41$. Проведена оценка точности регрессионных моделей с полиномами разных порядков, показавшая наибольшую эффективность кубического полинома. Определен набор наиболее информативных для решаемой задачи спектральных интервалов, на основе которого проведен множественный регрессионный анализ, показавший наиболее высокую точность.

Заключение. Предложенный подход к бесконтактному количественному анализу свежести плодов земляники отличается объективностью, производительностью и автоматизированностью. Проведенная оценка отдельных этапов пробоподготовки, съемки, цифровой обработки данных и статистического анализа будет полезна при разработке методов диагностики продуктов питания. Предложенный подход может стать дополнением традиционных методов контроля качества пищевой продукции и использоваться при формировании оптимальных стратегий транспортировки, обработки, хранения и реализации партий земляники.

Ключевые слова: неинвазивная диагностика; гиперспектральная съемка; видеоспектрометр; спектральные характеристики; свежесть; земляника

Для цитирования. Нестеров, Г. В., Гурyleва, А. В., Шарикова, М. О., Суханова, С. А., & Мачихин, А. С. (2025). Исследование возможности применения гиперспектральной съемки для оценки свежести плодов земляники. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(1), 500-517. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-1-1041>

Original article

STRAWBERRY FRESHNESS ASSESSMENT BY HYPERSPECTRAL IMAGING

*G.V. Nesterov, A.V. Guryleva, M.O. Sharikova,
S.A. Sukhanova, A.S. Machikhin*

Abstract

Background. Strawberry is a highly valued and perishable food item. The freshness of these fruits plays a crucial role in their quality, as it determines their shelf life, nutritional content, visual appeal, and safety for human consumption. Traditional methods of assessing fruit freshness are subjective, labor-intensive, and have low productivity. This study aims to develop a methodology for quantitatively assessing

the freshness of strawberries using hyperspectral imaging, which can provide objective and accurate measurements of fruit quality.

Materials and method. During the research, we evaluated the spectral properties of the outer surface and internal structure of strawberries from “Remontant Elizabeth II” over a period of 26 days after harvesting. The measuring instrument used was an acousto-optical Vis-NIR imaging spectrometer. Digital data processing involved preprocessing spectral images, morphological analysis, and calculating a quantitative metric for spectral reflectance at the most informative wavelengths. Statistical analysis was based on constructing regression models to determine the post-harvest period for strawberries. Model evaluation was done using the coefficients of determination (R^2), relative error (RE), and root mean squared error (RMSE).

Results. The methodology for assessing the freshness of strawberries using hyperspectral imaging has been proposed. Mathematical models for determining the post-harvest period of “Remontant Elizaveta II” strawberries were obtained using hyperspectral images of the surface and internal structure of the samples. Analysis of the spectral properties of the external surface of fruits showed higher accuracy in determining the postharvest period, with $R^2 = 0.96$, RE = 22.78% and RMSE = 1.41. Regression models with different polynomial orders were assessed, and the cubic polynomial showed the greatest effectiveness. A set of the most informative wavelengths was determined, based on which multiple regression analysis was performed, demonstrating the highest accuracy.

Conclusion. The developed methodology for quantitative analysis of strawberry freshness stands out for its precision, objectivity, efficiency, and automation. Assessment of individual stages, including sample preparation, hyperspectral imaging, digital data processing, and statistical analysis will be beneficial to advance methods for spectral diagnostics of food products. Proposed approach could supplement traditional methods of food quality control. Research could be used to develop optimal strategies for transportation, processing, storage and marketing of strawberry batches.

Keywords: non-invasive diagnostics; hyperspectral imaging; imaging spectrometer; spectral characteristics; freshness; strawberry

For citation. Nesterov, G. V., Guryleva, A. V., Sharikova, M. O., Sukhanova, S. A., & Machikhin, A. S. (2025). Strawberry Freshness Assessment by Hyperspectral Imaging. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 17(1), 500–517. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2025-17-1-1041>

Введение

Земляника садовая (*Fragaria ananassa*) является одной из самых распространенных выращиваемых во всем мире ягодных культур ввиду высоких

вкусовых качеств ее плодов и содержания в них питательных и полезных фитохимических веществ, в том числе антиоксидантных соединений: фенольных соединений, фолиевой кислоты, каротиноидов и витамина С [3; 10]. Основным недостатком плодов земляники является ее малая лежкость, то есть быстрое снижение качества плодов после сбора из-за ускорения процессов дозревания и деградации клеточных структур. При формировании оптимальных стратегий транспортировки, обработки, хранения и реализации партий земляники решающим параметром оказывается ее свежесть, влияющая на срок сохранения плодами питательной ценности, внешней привлекательности и безопасности для потребителя [6].

Контроль качества плодов, в том числе их свежести, произвольных партий земляники традиционно производится на основе визуальной оценки и исследования органолептических показателей [17], а также анализа физико-химических [11; 15; 16] и биохимических параметров [4; 20; 24]. При этом перечисленные методы весьма трудоемки, а в ряде случаев дают лишь качественный и субъективный результат или требуют специальных реактивов. Свободны от указанных недостатков оптические методы бесконтактной диагностики на основе анализа характеристик излучения, отраженного от объектов исследования [22].

Ряд исследований показал эффективность количественного анализа ключевых химических и физических параметров плодов с помощью спектральных приборов [7; 8; 19; 21]. Наиболее технологически простой реализацией такого подхода является регистрация спектра отражения некоторой площади, показавшая эффективность в некоторых задачах [18; 25]. Этот подход не позволяет получить пространственное распределение спектральных характеристик плода и определить размеры выявленных дефектов. Преодолеть эти ограничения позволяют видеоспектрометры, регистрирующие спектр отражения поверхности в каждой точке изображения и обеспечивающие анализ пространственно-спектральных свойств объектов. Использование таких приборов значительно повышает производительность исследования, что важно для контроля крупных партий продукции.

Известны работы, в которых видеоспектрометрия применялась для оценки спелости плодов земляники [9; 23]. При этом изменения пространственно-спектральных характеристик на различных этапах развития плодов сопоставлялись с изменениями в содержании пигментов, влаги, сахаров и прочих химических веществ и с помощью методов машинного обучения определялись модели, позволяющие судить о зрелости плодов. В настоящей работе предлагается оценить возможность применения видеоспектро-

метрии для оценки качества плодов земляники после их сбора, в частности, для определения периода времени, прошедшего с момента сбора.

Материалы и методы

Схема эксперимента

Общая схема проведенного экспериментального исследования представлена на рис. 1. Для оценки свежести плодов земляники по анализу изменений спектральных характеристик как внешней поверхности плодов, так и их внутренней структуры, были подготовлены два варианта образцов земляники. Спектральные характеристики всех образцов в течение 26 дней в рабочие дни регистрировались видеоспектрометром. Для устранения пространственно-спектральных искажений полученные спектральные изображения проходили цифровую обработку. С помощью регрессионного анализа метрик, рассчитанных по полученным спектральным данным, для различных дней была получена модель, описывающая изменение спектральных свойств с течением времени после сбора и предлагаемая в дальнейшем для оценки свежести произвольных партий клубники.

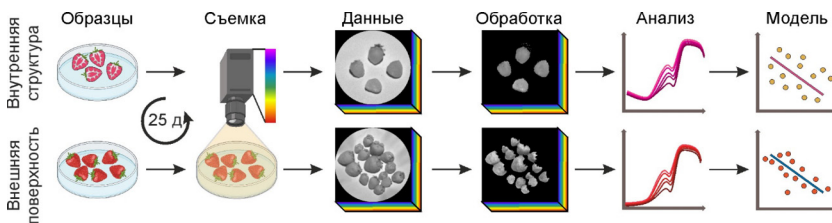


Рис. 1. Основные этапы проведения исследования.

Экспериментальные образцы

В качестве экспериментальных образцов использовались плоды земляники сорта Ремонтантная Елизавета II, выращенные в теплицах ООО «Ф.И. Топос Лаб» в Московской области. Для проведения исследования средняя проба массой 3 кг со 100 земляничных кустов была собрана и в течение 1 часа доставлена в лабораторию для дальнейшего хранения и регулярной съемки. Хранение плодов осуществлялось в холодильной камере при температуре 3,0-3,5°C и влажности воздуха 85-95%. Для эксперимента плоды вынимали из холодильной камеры и размещали в поле зрения видеоспектрометра.

Все плоды были разделены на две части, подготовленные по двум разным схемам в двух повторностях. Для оценки свежести по состоянию поверхности плода на две плоских белых подложки в первый день было выложено по

15 плодов в один слой. Плоды не смещались в течение всего эксперимента, в том числе в ходе регистрации изображений и хранения, для исключения повреждения плодов, а также устранения влияния на получаемые данные изменений их положения. В рамках второй схемы, предназначенной для исследования изменений спектральных свойств внутренней структуры с течением времени, каждый день перед съемкой произвольно отбирались и разрезались вдоль на две равные части четыре плода, а полученные половинки размещались срезом вверх на белых подложках.

Экспериментальная установка

Видеоспектрометры позволяют регистрировать спектральные характеристики объектов в каждом элементе поля зрения, а результатом съемки является набор спектральных изображений. В настоящей работе они регистрировались с помощью разработанного в НТЦ УП РАН акустооптического видеоспектрометра [2]. Съемка проводилась в диапазоне длин волн от 460 до 820 нм с шагом 2 нм. Размер изображения составлял 500×500 пикселей. Помимо регистрации изображений экспериментальных образцов, проводилась съемка плоской белой равномерно отражающей пластины для последующей предобработки данных в тех же спектральных каналах. В качестве источника широкополосного излучения использовалась галогенная лампа (Dedolight DLH4, 150 Вт).

Обработка и анализ гиперспектральных данных

Полученные в рамках исследования спектральные изображения подвергались предобработке, включающей устранение вызванного оптической системой виньетирования, неравномерности освещенности образцов и учета спектра излучения источника, а также пространственно-спектральных искажений и шума. Виньетирование и неравномерность освещенности компенсировались за счет попиксельного деления регистрируемого спектрального изображения на изображение калибровочной пластины, которая снималась после каждой съемки в тех же условиях [13]. Вместе с этим устранялось влияние спектральных свойств источника излучения. Пространственно-спектральные артефакты, вызванные шумом, снижались за счет медианной фильтрации изображений, заключающейся в замене каждого пикселя в изображении на медианное значение интенсивности пикселей в его окрестности размером 3×3×3 пикселя, что позволяет одновременно устранить спектральную и пространственную неоднородность.

После предобработки изображений проводилось выделение области интереса, необходимой для последующего анализа. Область интереса выделялась путем создания бинарной маски на основе отношения коэффи-

циентов отражения в разных спектральных диапазонах. Так, с помощью деления спектральных изображений на длинах волн 800 нм и 600 нм производилось выделение пикселей кадра, относящихся к плодоножке и чашечке плода, для последующего их исключения из расчета спектральной характеристики плода. Определение областей изображения, соответствующих фону, осуществлялось на основе анализа величины отношения интенсивностей пикселей двух спектральных изображений на разных длинах волн, так как для пикселей белой подложки и теней от плодов характерны близкие к единице значения такого отношения.

Пиксели, не относящиеся к фону, теням, плодоножке и чашечке плода, считались областями изображения, соответствующими разросшемуся цветоложу земляники. В пределах таких областей производилось усреднение значений пикселей для каждого изображения, что позволило получить спектральную зависимость коэффициента отражения всех экспериментальных образцов. Для каждой повторности и двух схем за все дни были получены графики спектральной характеристики отражения по описанной выше схеме, то есть всего 36 кривых. Для проведения последующего статистического анализа по каждому графику была рассчитана количественная метрика, представляющая собой интегральную спектральную характеристику отражения образца в диапазоне длин волн от 600 нм до 650 нм. Такой диапазон выбран на основе данных исследования, показавшего, что наибольшее изменение спектрального отклика земляники сорта «Brilliance» после сбора наблюдается в указанном диапазоне длин волн [14].

Статистический анализ

Полученные интегральные значения отражения в диапазоне от 600 нм до 650 нм за 26 дней эксперимента оценивались с помощью регрессионного анализа. Ранее было показано, что изменение в спектральных свойствах плодов земляники происходит нелинейным образом [5,12], поэтому в настоящей работе рассматривались регрессионные модели 1, 2 и 3 порядка. Для оценки свежести по спектральным свойствам поверхности плода и внутренней структуры регрессионные модели строились отдельно. Достоверность моделей определялась с помощью коэффициента детерминации R^2 и среднеквадратичной RMSE и относительной RE ошибок.

В работе также использовался подход к анализу данных, заключающийся в поиске наиболее информативных для решения рассматриваемой задачи длин волн и оценке изменения в ходе эксперимента величины коэффициента отражения только в соответствующих им спектральных каналах с помощью многомерной регрессии. Регистрация изображений прово-

дилась в 181 спектральном канале. Значение коэффициента отражения плодов в каждом из них рассматривалось как отдельный независимый признак. Среди таких признаков производился выбор наиболее информативных с помощью модифицированного алгоритма шаговой регрессии на основе распределения χ^2 [1]. Экспериментальные данные обрабатывали с помощью общепринятых методов математической статистики с применением программного пакета MATLAB 2021b.

Результаты

В соответствии с описанной схемой эксперимента были получены спектральные коэффициенты отражения плодов земляники в течение 26 дней после сбора, представленные на рисунке 2. Наибольший разброс значений от первого до последнего дня исследования наблюдается в диапазоне длин волн от 600 до 650 нм, что согласуется с литературными данными [14].

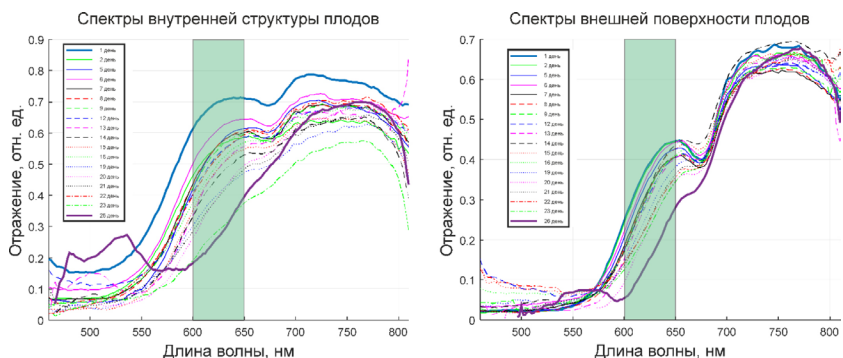


Рис. 2. Спектральные зависимости коэффициента отражения, полученные при съемке внутренней структуры (слева) и внешней (справа) поверхности плодов земляники. Утолщенными линиями отмечены графики, соответствующие первому (синяя линия) и последнему (фиолетовая линия) дню эксперимента. Зеленая область показывает диапазон длин волн, в пределах которого рассчитывалось интегральное значение спектральной характеристики, используемой при построении регрессионных моделей.

Значения спектрального коэффициента отражения в пределах диапазона длин волн, выделенного зеленым на рисунке 2, использовались для расчета интегрального значения спектральной характеристики. Изменение этого параметра за время исследования приведено на рисунке 3 (синие точки) и может служить количественной мерой для оценки деградации структуры плодов.

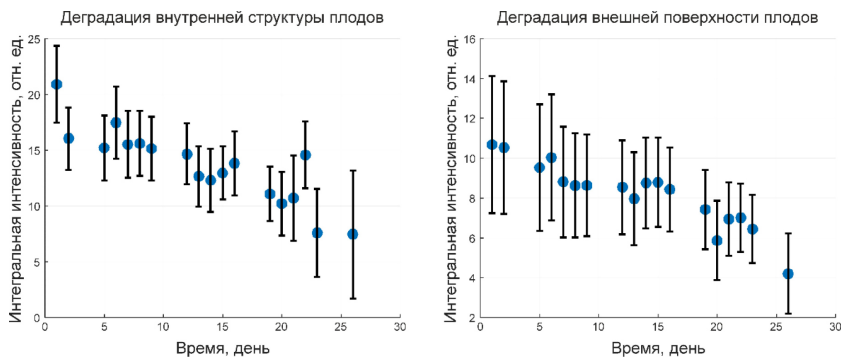


Рис. 3. Изменение среднего значения по кадру (синие точки) интегрального коэффициента отражения внутренней структуры (слева) и внешней поверхности (справа) цветоложе земляники в диапазоне длин волн 600-650 нм в ходе эксперимента. Разброс определялся значениями интегрального коэффициента отражения в отдельных пикселях, относящихся к цветоложу земляники.

По полученным значениям интегрального спектрального коэффициента отражения были построены регрессионные модели 1, 2 и 3 порядков (рис. 4). Регрессионные модели первого порядка, полученные по данным изменения спектральных свойств внутренней структуры и внешней поверхности плодов, позволили определить срок после сбора земляники с $R^2 = 0.76$, $RE = 23.88\%$, $RMSE = 0.78$ и $R^2 = 0.77$, $RE = 22.93\%$, $RMSE = 1.63$. При небольших различиях меньшую среднеквадратичную ошибку показала модель, связанная с внешней структурой. Параметры моделей первого и второго порядка имеют схожие значения. Наиболее достоверной моделью из представленных на рисунке 4 оказалась регрессия третьего порядка, полученная по данным съемки внешней поверхности плодов с показателями $R^2 = 0.83$, $RE = 17.47\%$, $RMSE = 0.67$, что согласуется с литературными данными о нелинейности изменения в пигментации при деградации плодов земляники после сбора.

Для проведения регрессионного анализа по описанной схеме были выбраны 4 наиболее информативные длины волны (610 нм, 630 нм, 646 нм, 680 нм), коэффициенты отражения на которых далее использовались при построении многомерной линейной регрессии. Полученная модель обеспечила определение срока после сбора земляники с наиболее высокими оценочными показателями $R^2 = 0.96$, $RE = 22.78\%$ и $RMSE = 1.41$.

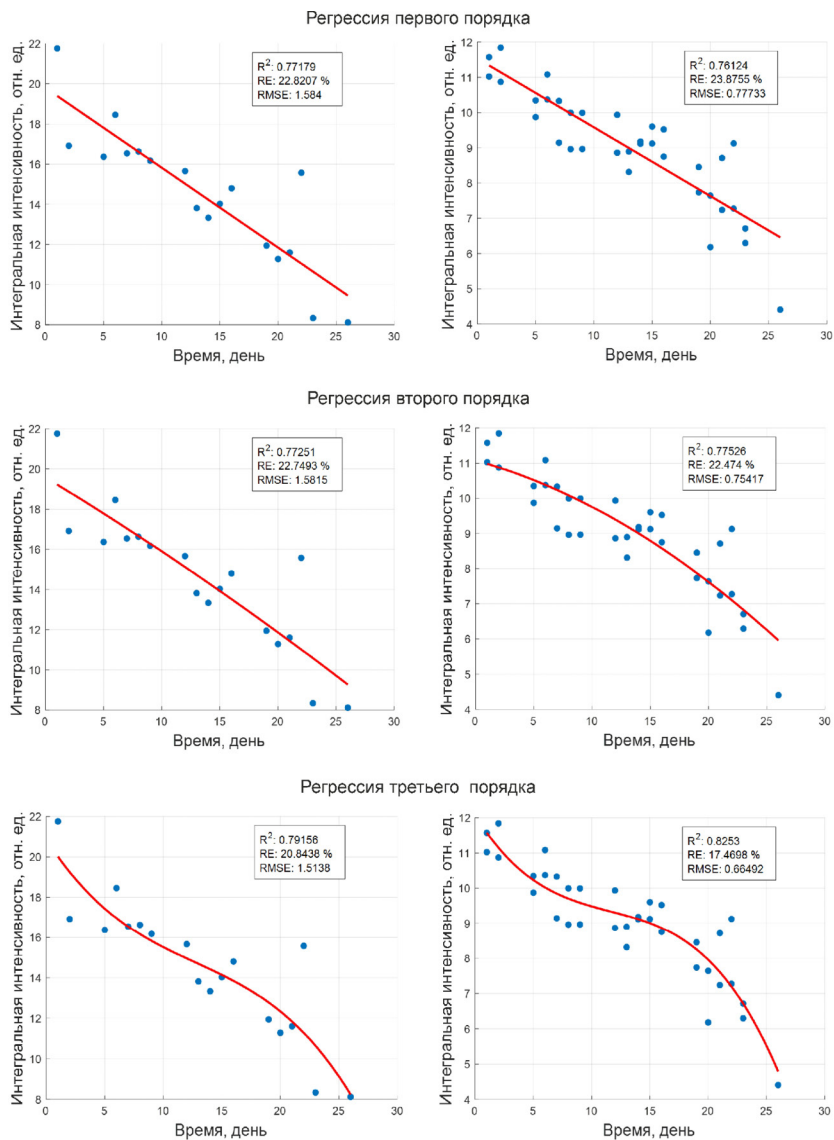


Рис. 5. Регрессионные модели разных порядков, построенные на основе данных об изменениях спектральных характеристик внутренней структуры (левый столбец) и внешней поверхности плодов (правый столбец).

Обсуждение

Работа посвящена исследованию возможности оценки свежести клубники с помощью гиперспектральной съемки. Ключевыми этапами предложенной методики являются подготовка образцов, регистрация спектральных изображений, их последующая обработка и анализ. В ходе экспериментальной апробации методики на плодах клубники сорта Ремонтантная Елизавета II были исследованы отдельные аспекты каждого из этапов и определены рекомендации к протоколу измерений, обеспечивающие наибольшую точность определения срока после сбора плодов.

Наиболее высокие значения оценочных показателей, а именно коэффициента детерминации, среднеквадратичной и относительной ошибки, были получены для моделей описания изменений спектральных характеристик плода во времени, построенных на основе данных гиперспектральной съемки внешней поверхности плодов. Такой результат, можно объяснить тем, что деградация тканей плода со временем в значительной степени связана с контактом кожицы плода с атмосферным воздухом, а внутренняя часть плода при этом дольше остается неизменной.

Конкретная реализация методики может зависеть от характеристик выбранного видеоспектрометра. Так, возможно упрощенное проведение измерений с помощью стандартной широкополосной монохромной камеры и оптического фильтра, выделяющего спектральный диапазон длин волн 600-650 нм. В этом случае для оценки имеется один признак и при анализе предпочтительным оказывается использование одномерной регрессионной модели третьего порядка, позволяющей учесть нелинейный характер изменений спектральных свойств плода, показанный в настоящей и других работах [5,12]. Использование видеоспектрометра или широкополосной камеры с узкополосными фильтрами с максимальным пропусканием на длинах волн 610 нм, 630 нм, 646 нм и 680 нм обеспечит возможность применения многомерного регрессионного анализа, показавшего наибольшую точность в оценке свежести земляники. Следует отметить, что значения определенных в настоящей работе наиболее информативных длин волн могут потребовать уточнения при работе с другими сортами земляники и видами плодовых растений. Преимуществом акустооптического видеоспектрометра является возможность произвольного выбора канала, обеспечивающего одновременно высокую производительность измерений и пригодность для работы с различными сортами и культурами.

Заключение

Исследована возможность количественного анализа свежести клубники на основе гиперспектральной съемки. Этот метод выгодно отличают точность, объективность, производительность и автоматизированность оценки. Экспериментальная апробация методики позволила подтвердить ее эффективность, а также выработать рекомендации по оптимальной реализации основных этапов, которые будут полезны для развития методов спектральной диагностики продуктов питания. Предложенный подход к оценке состояния плодов может стать дополнением традиционных методов контроля качества пищевой продукции и использоваться при формировании оптимальных методик транспортировки, обработки, хранения и реализации партий земляники.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Работа проводилась в рамках выполнения государственного задания НТЦ УП РАН (проект FFNS-2022-0010).

Благодарности. Результаты работы получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН (НТЦ УП РАН) [<http://ckp.ntcup.ru>].

Список литературы

1. Леонтьева, Л. Н. (2012). Последовательный выбор признаков при восстановлении регрессии. *Машинное обучение и анализ данных*, 1(3), 335–346.
2. Pozhar, V. E., et al. (2019). Hyperspectrometer based on an acousto-optic tunable filter for unmanned aerial vehicles. *Light & Engineering*, 27(3), 99–104. <https://doi.org/10.33383/2018-029>
3. Azzini, E., et al. (2010). Bioavailability of strawberry antioxidants in human subjects. *British Journal of Nutrition*, 104(8), 1165–1173. <https://doi.org/10.1017/S000711451000187X>
4. Bae, H., et al. (2014). Assessment of organic acids and sugars in apricots, plums, plumcots, and peaches during fruit maturation. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 87, 24–29. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2014.087.004>
5. Bevacqua, D., Quilot-Turion, B., & Bolzoni, L. (2018). A model for temporal dynamics of brown rot propagation in fruit orchards. *Phytopathology*, 108(5), 595–601. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-17-0250-R>
6. Choi, J. Y., et al. (2021). Application of convolutional neural networks to assess the external quality of strawberries. *Journal of Food Composition and Analysis*, 102, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104071>

7. Devassy, B. M., & George, S. (2021). Comparison of Regression Models for Estimating Strawberry Firmness Using Hyperspectral Imaging: Spectral Pre-processing to Compensate for Packaging Film. *Journal of Spectral Imaging*, 10, 55–69. <https://doi.org/10.1255/jsi.2021.a3>
8. ElMasry, G., et al. (2007). Hyperspectral imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberries. *Journal of Food Engineering*, 81(1), 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.10.016>
9. Gao, Z., et al. (2020). Real-time hyperspectral imaging for estimating strawberry ripeness in the field using deep learning. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 4, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2020.04.003>
10. Giampieri, F., et al. (2012). The strawberry: composition, nutritional quality, and impact on human health. *Nutrition*, 28(1), 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2011.08.009>
11. Hu, X. F., et al. (2016). Nondestructive hardness assessment of kiwifruit using near-infrared spectroscopy. *Proceedings - 2016 6th International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control, IMCCC 2016*, pp. 69–72. <https://doi.org/10.1109/IMCCC.2016.109>
12. Jha, S. K., et al. (2010). Firmness characteristics of mango hybrids under ambient storage. *Journal of Food Engineering*, 97(2), 208–212. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.10.011>
13. Katrašnik, J., Pernuš, F., & Likar, B. (2013). Radiometric calibration and noise estimation of acousto-optic tunable filter hyperspectral imaging systems. *Applied Optics*, 52(15), 3526–3537. <https://doi.org/10.1364/AO.52.003526>
14. Ktenioudaki, A., et al. (2022). Decision support tool for determining shelf-life of strawberries using hyperspectral imaging technology. *Biosystems Engineering*, 221, 105–117. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.06.013>
15. Lu, R., & Peng, Y. (2006). Hyperspectral scattering for assessing peach fruit firmness. *Biosystems Engineering*, 93(2), 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.11.004>
16. Mendoza, F., et al. (2011). Integrated spectral and image analysis of hyperspectral scattering data for prediction of apple fruit firmness and soluble solids content. *Postharvest Biology and Technology*, 62(2), 149–160. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.05.009>
17. Nunes, C. N., & Emond, J.-P. (2007). Relationship between weight loss and visual quality of fruits and vegetables. *Proceedings of Florida State Horticultural Society*, 120, 235–245.
18. Omar, A. F. (2013). Spectroscopic profiling of soluble solids content and acidity of intact grapes, limes, and starfruit. *Sensor Review*, 33(3), 238–245. <https://doi.org/10.1108/02602281311324690>

19. Sánchez, M. T., et al. (2012). Non-destructive characterization and quality control of intact strawberries based on NIR spectral data. *Journal of Food Engineering*, *110*(1), 102–108. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.12.003>
20. Seki, H., et al. (2023). Visualization of sugar content distribution in white strawberries using near-infrared hyperspectral imaging. *Foods*, *12*(5), 122–136. <https://doi.org/10.3390/foods12050931>
21. Shao, Y., & He, Y. (2008). Nondestructive measurement of acidity of strawberries using visible and near infrared spectroscopy. *International Journal of Food Properties*, *11*(1), 102–111. <https://doi.org/10.1080/10942910701257057>
22. Wang, H., et al. (2015). Fruit quality evaluation using spectroscopy technology: A review. *Sensors (Switzerland)*, *15*(5), 11889–11927. <https://doi.org/10.3390/s150511889>
23. Zhang, C., et al. (2016). Hyperspectral imaging analysis for ripeness evaluation of strawberries using support vector machine. *Journal of Food Engineering*, *179*, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.002>
24. Zhang, D., et al. (2018). Rapid prediction of sugar content in Dangshan pear (*Pyrus spp.*) using hyperspectral imagery data. *Food Analytical Methods*, *11*(8), 2336–2345. <https://doi.org/10.1007/s12161-018-1212-3>
25. Zhang, Y., et al. (2015). Predicting apple sugar content based on spectral characteristics of apple tree leaves in different phenological stages. *Computers and Electronics in Agriculture*, *112*, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.01.006>

References

1. Leonteva, L. N. (2012). Sequential feature selection in regression recovery. *Journal of Machine Learning and Data Analysis*, *1*(3), 335–346.
2. Pozhar, V. E., et al. (2019). Hyperspectrometer based on an acousto-optic tunable filter for unmanned aerial vehicles. *Light & Engineering*, *27*(3), 99–104. <https://doi.org/10.33383/2018-029>
3. Azzini, E., et al. (2010). Bioavailability of strawberry antioxidants in human subjects. *British Journal of Nutrition*, *104*(8), 1165–1173. <https://doi.org/10.1017/S000711451000187X>
4. Bae, H., et al. (2014). Assessment of organic acids and sugars in apricots, plums, plumcots, and peaches during fruit maturation. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, *87*, 24–29. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2014.087.004>
5. Bevacqua, D., Quilot-Turion, B., & Bolzoni, L. (2018). A model for temporal dynamics of brown rot propagation in fruit orchards. *Phytopathology*, *108*(5), 595–601. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-17-0250-R>

6. Choi, J. Y., et al. (2021). Application of convolutional neural networks to assess the external quality of strawberries. *Journal of Food Composition and Analysis*, 102, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104071>
7. Devassy, B. M., & George, S. (2021). Comparison of Regression Models for Estimating Strawberry Firmness Using Hyperspectral Imaging: Spectral Pre-processing to Compensate for Packaging Film. *Journal of Spectral Imaging*, 10, 55–69. <https://doi.org/10.1255/jsi.2021.a3>
8. ElMasry, G., et al. (2007). Hyperspectral imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberries. *Journal of Food Engineering*, 81(1), 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.10.016>
9. Gao, Z., et al. (2020). Real-time hyperspectral imaging for estimating strawberry ripeness in the field using deep learning. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 4, 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2020.04.003>
10. Giampieri, F., et al. (2012). The strawberry: composition, nutritional quality, and impact on human health. *Nutrition*, 28(1), 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2011.08.009>
11. Hu, X. F., et al. (2016). Nondestructive hardness assessment of kiwifruit using near-infrared spectroscopy. *Proceedings - 2016 6th International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control, IMCCC 2016*, pp. 69–72. <https://doi.org/10.1109/IMCCC.2016.109>
12. Jha, S. K., et al. (2010). Firmness characteristics of mango hybrids under ambient storage. *Journal of Food Engineering*, 97(2), 208–212. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.10.011>
13. Katrašnik, J., Pernuš, F., & Likar, B. (2013). Radiometric calibration and noise estimation of acousto-optic tunable filter hyperspectral imaging systems. *Applied Optics*, 52(15), 3526–3537. <https://doi.org/10.1364/AO.52.003526>
14. Ktenioudaki, A., et al. (2022). Decision support tool for determining shelf-life of strawberries using hyperspectral imaging technology. *Biosystems Engineering*, 221, 105–117. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.06.013>
15. Lu, R., & Peng, Y. (2006). Hyperspectral scattering for assessing peach fruit firmness. *Biosystems Engineering*, 93(2), 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.11.004>
16. Mendoza, F., et al. (2011). Integrated spectral and image analysis of hyperspectral scattering data for prediction of apple fruit firmness and soluble solids content. *Postharvest Biology and Technology*, 62(2), 149–160. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.05.009>
17. Nunes, C. N., & Emond, J.-P. (2007). Relationship between weight loss and visual quality of fruits and vegetables. *Proceedings of Florida State Horticultural Society*, 120, 235–245.

18. Omar, A. F. (2013). Spectroscopic profiling of soluble solids content and acidity of intact grapes, limes, and starfruit. *Sensor Review*, 33(3), 238–245. <https://doi.org/10.1108/02602281311324690>
19. Sánchez, M. T., et al. (2012). Non-destructive characterization and quality control of intact strawberries based on NIR spectral data. *Journal of Food Engineering*, 110(1), 102–108. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.12.003>
20. Seki, H., et al. (2023). Visualization of sugar content distribution in white strawberries using near-infrared hyperspectral imaging. *Foods*, 12(5), 122–136. <https://doi.org/10.3390/foods12050931>
21. Shao, Y., & He, Y. (2008). Nondestructive measurement of acidity of strawberries using visible and near infrared spectroscopy. *International Journal of Food Properties*, 11(1), 102–111. <https://doi.org/10.1080/10942910701257057>
22. Wang, H., et al. (2015). Fruit quality evaluation using spectroscopy technology: A review. *Sensors (Switzerland)*, 15(5), 11889–11927. <https://doi.org/10.3390/s150511889>
23. Zhang, C., et al. (2016). Hyperspectral imaging analysis for ripeness evaluation of strawberries using support vector machine. *Journal of Food Engineering*, 179, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.002>
24. Zhang, D., et al. (2018). Rapid prediction of sugar content in Dangshan pear (*Pyrus spp.*) using hyperspectral imagery data. *Food Analytical Methods*, 11(8), 2336–2345. <https://doi.org/10.1007/s12161-018-1212-3>
25. Zhang, Y., et al. (2015). Predicting apple sugar content based on spectral characteristics of apple tree leaves in different phenological stages. *Computers and Electronics in Agriculture*, 112, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.01.006>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАнные ОБ АВТОРАХ

Нестеров Георгий Владимирович, инженер-исследователь лаборатории акустооптической спектроскопии
Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН
ул. Бутлерова, 15, г. Москва, 117342, Российская Федерация
NesterovGeorgiyV@yandex.ru

Гурылева Анастасия Валентиновна, научный сотрудник лаборатории акустооптической спектроскопии
*Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН
ул. Бутлерова, 15, г. Москва, 117342, Российская Федерация
guryleva.av@ntcup.ru*

Шарикова Милана Олеговна, младший научный сотрудник лаборатории акустооптической спектроскопии
*Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН
ул. Бутлерова, 15, г. Москва, 117342, Российская Федерация
sharikova.mo@ntcup.ru*

Суханова Светлана Александровна, генеральный директор
*Общество с ограниченной ответственностью «ФОТИНИЯ. И. ТО-ПОС ЛАБОРАТОРИЯ»
ул. Калинина, 107а, ст-ца Динская, Динской р-н, Краснодарский край, 353204, Российская Федерация
f.i.toposlab@mail.ru*

Мачихин Александр Сергеевич, заведующий лабораторией акустооптической спектроскопии
*Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН
ул. Бутлерова, 15, г. Москва, 117342, Российская Федерация
machikhin@ntcup.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Georgiy V. Nesterov, Research Engineer at the Laboratory of Acousto-optic Spectroscopy
*Scientific and Technological Center of Unique Instrument Engineering of the Russian Academy of Sciences
15, Butlerova Str., Moscow, 117342, Russian Federation
NesterovGeorgiyV@yandex.ru
SPIN-code: 7418-5381
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2239-3725>*

Anastasia V. Guryleva, Researcher at the Laboratory of Acousto-optic Spectroscopy
Scientific and Technological Center of Unique Instrument Engineering of the Russian Academy of Sciences

15, Butlerova Str., Moscow, 117342, Russian Federation
guryleva.av@ntcup.ru
SPIN-code: 2873-8095
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2239-3725>
ResearcherID: ABA-3399-2021
Scopus Author ID: 57212027073

Milana O. Sharikova, Junior Researcher at the Laboratory of Acousto-optic Spectroscopy
Scientific and Technological Center of Unique Instrument Engineering of the Russian Academy of Sciences
15, Butlerova Str., Moscow, 117342, Russian Federation
sharikova.mo@ntcup.ru
SPIN-code: 5269-2077
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5593-6170>
ResearcherID: GQY-7045-2022
Scopus Author ID: 57218281289

Svetlana A. Sukhanova, General Director
'FOTINIA. I. TOPOS LABORATORY' Limited Liability Company
107a, Kalinina Str., Dinskaya, Dinskoy District, Krasnodar Krai, 353204, Russian Federation
f.i.toposlab@mail.ru

Alexander S. Machikhin, Head of the Laboratory of Acousto-optic Spectroscopy
Scientific and Technological Center of Unique Instrument Engineering of the Russian Academy of Sciences
15, Butlerova Str., Moscow, 117342, Russian Federation
machikhin@ntcup.ru
SPIN-code: 4060-7193
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2864-3214>
ResearcherID: L-4381-2016
Scopus Author ID: 23012533400

Поступила 15.05.2024
После рецензирования 28.05.2024
Принята 05.06.2024

Received 15.05.2024
Revised 28.05.2024
Accepted 05.06.2024