

Р.А. Филиппов, канд. с.-х. наук

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный агроинженерный центр ВИИМ», г. Москва
e-mail: rostislav-filippov@yandex.ru*

ПЕРСПЕКТИВЫ ДИСТАНЦИОННОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СПЕЛОСТИ ЗЕМЛЯНИКИ САДОВОЙ ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Ключевые слова: роботизированный сбор, земляника садовая, спелость, мультиспектральная визуализация, гиперспектральная визуализация, сенсорная фузия.

Key words: robotic harvesting, garden strawberry, ripeness, multispectral imaging, hyperspectral imaging, sensor fusion.

Аннотация: В статье представлен обзор современных дистанционных методов неразрушающего контроля спелости земляники садовой для интеграции в роботизированные системы сбора урожая. Рассмотрены оптические методы (мультиспектральная и гиперспектральная визуализация) и метод анализа летучих органических соединений. Выявлены их сильные и слабые стороны в контексте полевой робототехники. Определены ключевые направления развития технологий на ближайшие 5–7 лет: мульти-сенсорная интеграция, периферийные вычисления и гибридные системы «зрение-осязание», позволяющие повысить точность и скорость сбора при минимизации повреждений плодов.

Summary: The article provides an overview of modern remote non-destructive methods for assessing the ripeness of strawberries for integration into robotic harvesting systems. Optical methods (multispectral and hyperspectral imaging) and the method of volatile organic compounds analysis are considered. Their strengths and weaknesses in the context of field robotics are identified. Key development directions for the next 5–7 years are determined: multi-sensor integration, edge computing, and hybrid "vision-touch" systems, which improve harvesting accuracy and speed while minimizing fruit damage.

Переход к автоматизированному сбору урожая продиктован дефицитом рабочей силы и растущим спросом на качественную продукцию. Разработка роботизированных систем [1,2], демонстрирует прогресс в навигации, однако критическим звеном остается сенсорная система. Робот должен не только обнаружить плод, но и точно оценить его спелость. Традиционная визуальная оценка субъективна и не всегда коррелирует с внутренними показателями качества. Контактные методы (микроволновая

спектроскопия) требуют точного позиционирования и замедляют сбор [3,4]. Дистанционные методы лишены этих недостатков и идеально подходят для мобильной робототехники. Цель обзора – систематизировать современные дистанционные методы оценки спелости и проанализировать перспективы их интеграции в роботизированные системы.

Современные методы неразрушающего контроля спелости можно классифицировать по физическому принципу взаимодействия с объектом. Для дистанционной оценки плодов в полевых условиях наибольший интерес представляют оптические методы в различных диапазонах электромагнитного спектра и методы анализа газовой фазы.

Современные методы неразрушающего контроля для дистанционной оценки в полевых условиях делятся на оптические и ольфакторные (рисунок 1).

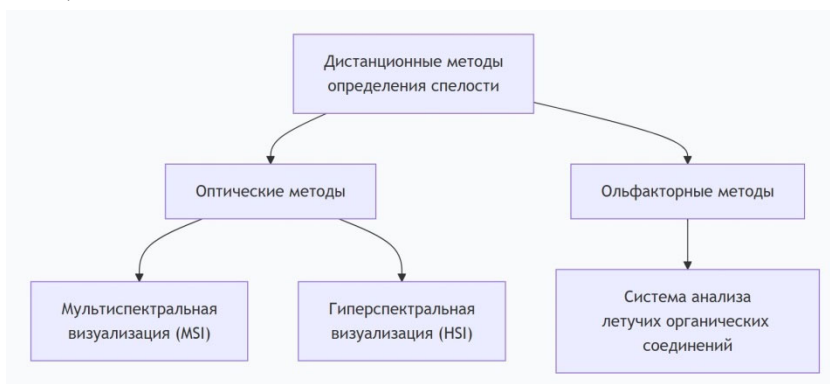


Рисунок 1. Классификация методов определения спелости

Мультиспектральная визуализация (MSI) основана на анализе отражения света в нескольких узких спектральных диапазонах (380–1000 нм). По мере созревания разрушается хлорофилл и синтезируются антоцианы, что меняет спектр отражения. Преимущества MSI: высокая скорость анализа, пригодность для работы в реальном времени, относительно невысокая стоимость и малые объемы данных. Исследования показывают, что данных MSI достаточно для классификации спелости с точностью до 100% и прогнозирования твердости и содержания сахаров [5].

Развитие оптических методов контроля спелости нашло отражение в патентных разработках, направленных на создание объективных и универсальных критериев оценки. В патенте RU 2778441C1 предложен способ дифференциации стадий зрелости плодов земляники садовой на основе расчета показателя зрелости $PZp = R670/R630$, где R670 и R630 – коэффициенты отражения на длинах волн 670 нм и 630 нм соответственно [6].

Выбор данных длин волн обусловлен их чувствительностью к биохимическим изменениям в процессе созревания: 670 нм соответствует области поглощения хлорофилла, а 630 нм – области, отражающей накопление антоцианов. Экспериментально установлено, что для незрелых плодов значение ПЗр составляет менее 0,8, для стадии съемной зрелости – 0,8–1,0, для потребительской зрелости – 1,0–1,4, а для перезревших – более 1,4.

Недостаток – меньшая информативность по сравнению с гиперспектральной визуализацией для оценки сложных биохимических параметров, а также коэффициенты отражения очень чувствительны к условиям освещения в полевых условиях. [7].

Гиперспектральная визуализация (HSI) регистрирует спектр в сотнях непрерывных каналов (400–2500 нм), формируя «гиперкуб» данных. Высокая спектральная плотность (разрешающая способность) позволяет выявлять тонкие особенности, связанные с сахарами, кислотами и водой [8]. Это дает возможность прогнозировать комплексные индексы качества (SQI) с высоким коэффициентом детерминации (R^2 до 0.916) [9]. Однако HSI генерирует огромные массивы данных, требующих сложной обработки и увеличивающих вычислительную нагрузку на бортовые системы, а оборудование существенно дороже.

Система анализа летучих органических соединений (ЛОС) – ольфакторный метод, использующий массив химических сенсоров для создания «отпечатка» запаха. Состав ЛОС меняется в процессе созревания: от альдегидов в незрелых плодах до сложных эфиров в спелых [10]. Метод чувствителен к «внутреннему» качеству и коррелирует с органолептическим восприятием. Однако его реализация в поле сложна из-за зависимости показаний от ветра, температуры и влажности, а также требует систем контролируемого забора проб.

Современные нейросетевые архитектуры, такие как Ripe-Detection, достигают точности (mAP50) 96.4% при малом количестве параметров (1.3 млн), что позволяет работать на бортовых компьютерах [11]. Программные решения для классификации степени зрелости на основе нейросетей также активно разрабатываются [12]. Среднее время цикла сбора составляет около 10.5 секунд, а уровень повреждений ягод жесткими манипуляторами достигает 25–30%. Новые гибкие тактильные сенсоры снижают этот показатель до 5–10% [13, 14].

Систематизация современных тенденций позволяет выделить три приоритетных направления развития дистанционных методов контроля спелости для роботизированных уборочных систем на ближайшие 5–7 лет: мультисенсорная интеграция, предполагающая комбинирование RGB-камер, лидаров и мультиспектральных сенсоров для формирования трехмерных семантических карт сцены, что обеспечивает одновременную локализацию плода и оценку его спелости со снижением количества ошибок [9,13].

Периферийные вычисления, заключающиеся в переносе обработки данных на борт робота с использованием легковесных нейросетевых архитектур (например, Ripe-Detection), что сокращает время инференса до 100 мс и снижает стоимость сенсорного модуля за счет отказа от облачной инфраструктуры [11], а также гибридные системы «зрение – осязание», в которых оптическая оценка спелости дополняется тактильным контролем в момент захвата, позволяющим динамически адаптировать усилие манипулятора и сократить долю поврежденных ягод с 23–25 % до 5–10 % [14]. Реализация указанных направлений обеспечит переход от экспериментальных образцов к промышленно применимым решениям.

Выводы. Проведенный анализ современных дистанционных методов контроля спелости земляники садовой, дополненный рассмотрением патентных разработок в данной области, позволяет сформулировать следующие выводы. Оптические методы, основанные на анализе спектра отражения в видимой и ближней инфракрасной областях, обладают наибольшим потенциалом для интеграции в роботизированные уборочные системы благодаря высокой скорости анализа и неразрушающему характеру измерений. Особый интерес представляют спектральные индексы, такие как отношение коэффициентов отражения на длинах волн 670 нм и 630 нм, которые, обеспечивают универсальную и объективную дифференциацию стадий зрелости – от незрелых до перезревших плодов – независимо от ботанического сорта. Данный подход может служить основой для создания упрощенных мультиспектральных сенсорных систем, работающих в реальном времени. Перспективы дальнейшего развития связаны с мультисенсорной интеграцией, где спектральные методы дополняются данными от RGB-камер, лидаров и тактильных датчиков, а также с внедрением периферийных вычислений на базе легковесных нейросетевых архитектур. Реализация указанных направлений позволит в ближайшие 5–7 лет обеспечить переход от экспериментальных образцов к промышленно применимым роботизированным решениям, способным не только заменить человека на сборе урожая, но и обеспечить более высокое и стабильное качество отбираемой продукции.

Список использованной литературы

1. Khort D.O., Kutyrev A.I., Filippov R.A., Vershinin R.V. Device for robotic picking of strawberries земляники // E3S Web of Conferences : материалы Международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве» (Sevastopol, 07–11 сентября 2020 г.). – 2020. – Vol. 193. – P. 01045. DOI:10.1051/e3sconf/202019301045.
2. Grimstad, L. The Thorvald II agricultural robotic system / L. Grimstad, P.J. From // Robotics. – 2017. – Vol. 6(4). – P. 24.
3. Agritech Future. Editor's View: How AI and Robotics Are Rethinking the Future of Strawberry Farming in the UK // Agritech Future. – 2025.

4. Mason, A. Electromagnetic sensing for non-destructive real-time fruit ripeness detection / A. Mason, O. Korostynska, P.J. From // Proceedings. – 2018. – Vol. 2(13). – P. 1051.
5. Zhang, C. Application of multispectral imaging to determine quality attributes and ripeness stage in strawberry fruit / C. Zhang [et al.] // PLoS ONE. – 2014. – Vol. 9(2). – P. e87818.
6. Митрофанова, А.В. Способ оценки степени зрелости плодов земляники садовой : пат. RU2778441C1 / А.В. Митрофанова, О.А. Митрофанова, А.А. Каменева [и др.]. – Опубл. 17.08.2022.
7. ElMasry, G. Hyperspectral imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberry / G. ElMasry [et al.] // Journal of Food Engineering. – 2007. – Vol. 81(1). – P. 98–107.
8. Wang, H. Fruit quality evaluation using spectroscopy technology: A review / H. Wang [et al.] // Sensors. – 2015. – Vol. 15(5). – P. 11889–11927.
9. Sun, M. Development of a comprehensive quality index for strawberry and its non-destructive prediction using hyperspectral imaging / M. Sun [et al.] // Food Control. – 2026. – Vol. 181. – P. 111754.
10. Baietto, M. Electronic-nose applications for fruit identification, ripeness and quality grading / M. Baietto, A.D. Wilson // Sensors. – 2015. – Vol. 15(1). – P. 899–931.
11. Yu, H. Ripe-Detection: A Lightweight Method for Strawberry Ripeness Detection / H. Yu [et al.] // Directory of Open Access Journals / MDPI. – 2025.
12. Филиппов Р.А., Кутырев А.И., Смирнов И.Г. Программа распознавания плодов земляники садовой и классификации степени зрелости : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024685179 ; заявл. 17.10.2024 ; опубл. 25.10.2024
13. Ren, G. Mobile robotics platform for strawberry sensing and harvesting / G. Ren [et al.] // Journal of Field Robotics. – 2023. – Vol. 41(7). – P. 2047–2065.
14. Khort D.O., Kutyrev A., Smirnov I., et al. Enhancing Sustainable Automated Fruit Sorting: Hyperspectral Analysis and Machine Learning Algorithms // Sustainability. – 2024. – Vol. 16, No. 22. – P. 10084. – DOI 10.3390/su162210084.

УДК 633.1:633.16

И.Ю. Кузнецов, д-р с.-х. наук, профессор,

Д.А. Гордеев, аспирант

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Башкирский государственный аграрный университет»,

г. Уфа

e-mail: dmitrgordeev13@yandex.ru

ВОЗДЕЛЫВАНИЕ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ В СЕВЕРНОЙ НИВЕ БАШКИРИИ

Ключевые слова: яровой ячмень, агротехника, Вакула РС-1

Key words: spring barley, agrotechnology, Vakula RS-1.