




Применение массива химических сенсоров для мониторинга степени зрелости плодов авокадо сорта Хасс

Никита О. Раков ¹	nikitarakovv@yandex.ru	 0009-0000-2001-6868
Людмила Г. Елисеева ²	eliseeva-reu@mail.ru	 0000-0003-2715-9989
Татьяна А. Кумченко ³	tak1907@mail.ru	 0000-0001-7812-9195

¹ Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Стремянный переулок 36, Москва, 115054, Россия




² Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, д. 19, г. Воронеж, 394000, Россия

³ ООО «Сенсорика – Новые Технологии», пр-т Революции, д. 19, г. Воронеж, 394000, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты исследования эффективности использования метода неразрушающего контроля по определению степени зрелости авокадо сорта Хасс с помощью системы сенсоров «электронный нос» на базе многоканального пьезогазоанализатора «МАГ-8». Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки физиологической активности и потенциальных сроков годности климактерических плодов с путем замены субъективных органолептических оценок объективными инструментальными онлайн методами контроля в цепи поставок с целью минимизации потерь скоропортящейся продукции. Целью данного исследования являлась оценка возможности применения разноселективного массива пьезокварцевых сенсоров многоканального газоанализатора «МАГ-8» для разработки экспрессного неразрушающего способа оценки степени зрелости плодов авокадо, позволяющего минимизировать потери продукции на всех этапах цепи поставок. Полученные результаты позволили дифференцировать плоды по стадиям созревания (незрелые, спелые, перезрелые) на основе анализа профилей летучих органических соединений, выделяемых плодами в процессе дозревания. В работе представлены данные, подтверждающие корреляцию принятых органолептических и физико-химических методов (эмиссия этилена, интенсивность дыхания, твердость, содержание сухих веществ, цвет, аромат), оценки степени зрелости плодов авокадо и результатов оценки. Результаты подтвердили наличие статистически значимых корреляций между параметрами сенсорных сигналов и физиологическим статусом плодов. Предложенный подход позволяет оперативно и с высокой воспроизводимостью классифицировать авокадо по степени зрелости и определять потенциальный остаточный срок годности продукции, что открывает перспективы для автоматизации складского мониторинга, оптимизации сроков реализации и снижения экономических издержек при импорте и хранении плодоовощной продукции.

Ключевые слова: авокадо, контроль качества, степень зрелости, летучие ароматические вещества, газовые сенсоры, оцифровка паттерна летучих соединений.

The use of an array of chemical sensors to monitor the degree of maturity of Hass avocado fruits

Nikita O. Rakov ¹	nikitarakovv@yandex.ru	 0009-0000-2001-6868
Lyudmila G. Eliseeva ²	eliseeva-reu@mail.ru	 0000-0003-2715-9989
Tatiana A. Kumchenko ³	tak1907@mail.ru	 0000-0001-7812-9195

¹ Plekhanov Russian University of Economics, Stremyanny Lane 36, Moscow, 115054, Russia

² Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Ave., 19, Voronezh, 394000, Russia

³ Sensorika – New Technologies LLC, Revolution Ave., 19, Voronezh, 394000, Russia

Abstract. The article presents the results of a study of the effectiveness of using the method of non-destructive testing to determine the degree of maturity of Hass avocados using an electronic nose sensor system based on a multichannel piezo gas analyzer MAG-8. The relevance of the study is due to the need to assess the physiological activity and potential shelf life of climacteric fruits by replacing subjective organoleptic assessments with objective instrumental online control methods in the supply chain in order to minimize the loss of perishable products. The purpose of this study was to evaluate the possibility of using a multiselective array of piezoquartz sensors of the multichannel gas analyzer MAG-8. to develop an express non-destructive method for assessing the degree of maturity of avocado fruits, which minimizes product losses at all stages of the supply chain. The obtained results made it possible to differentiate fruits by stages of maturation (immature, ripe, overripe) based on the analysis of profiles of volatile organic compounds (VOCs) released by fruits during maturation. The paper presents data confirming the correlation of the accepted organoleptic and physico-chemical methods (ethylene emission, respiration rate, hardness, dry matter content, color, aroma). assessment of the degree of maturity of avocado fruits and evaluation results. The results confirmed the presence of statistically significant correlations between the parameters of sensory signals and the physiological status of fetuses. The proposed approach makes it possible to quickly and reproducibly classify avocados according to the degree of maturity and determine the potential remaining shelf life of products, which opens up prospects for automating warehouse monitoring, optimizing sales dates and reducing economic costs during import and storage of fruit and vegetable products.)

Keywords: avocado, quality control, degree of maturity, volatile aromatic substances, gas sensors, digitization of the pattern of volatile compounds.

Для цитирования

Раков Н.О., Елисеева Л.Г., Кумченко Т.А. Применение массива химических сенсоров для мониторинга степени зрелости плодов авокадо сорта Хасс // Вестник ВГУИТ. Т. 2. № 2. С. 132–141. doi:10.20914/2310-1202--2-132-141

For citation

Rakov N.O., Eliseeva L.G., Kumchenko T.A. The use of an array of chemical sensors to monitor the degree of maturity of Hass avocado fruits. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. . vol. . no. 2. pp. 132–141. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202--2-132-141

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Тренд на здоровое питание, высокая пищевая ценность авокадо способствовали резкому увеличению спроса и объемам продаж авокадо в России. За последние 5 лет объем импорта авокадо увеличился более чем в 4 раза. В 2025 г. авокадо импортировали в Россию из 8 различных стран, включая Египет, Кению, Турцию, Израиль, Сирия, Иран, Азербайджан, Узбекистан. Самым популярным и доминирующим сортом авокадо на мировом рынке и в России является сорт Хасс. Пищевая ценность авокадо определяется высоким содержанием мононенасыщенных и полиненасыщенных жирных кислот, комплексом витаминов (К, С, В5, В6, Е), минеральных веществ, флавоноидов, антиоксидантов, клетчатки, необходимых для профилактики алиментарных заболеваний. Широкая география поставок авокадо в Россию, длительная логистика, несоблюдение требований к степени зрелости на этапах сбора урожая и нарушение температурно-временных условий поставки и хранения приводят к значительным потерям плодов. В этой связи управление качеством авокадо на всех этапах товародвижения является критически важным фактором для удовлетворения ожиданий потребителей и поддержания репутации бренда. При хранении, транспортировании и реализации на каждом этапе продвижения плодов к потребителю, осуществляется оценка органолептических свойств и определения степени зрелости, так эти показатели являются определяющими критериями для адекватной оценки потребительских свойств и прогнозирования оптимальных сроков лежкоспособности. Правильное определение степени зрелости авокадо перед сбором урожая влияет на дальнейшее созревание и вкусовые качества плода после дозревания. Практически на всех этапах движения товара от производителя до потребителя происходит трансформация состава ароматических веществ, поэтому количественная оценка летучих ароматических веществ является важным критерием, способным характеризовать уровень зрелости плодов. Объективная оценка этого показателя с возможностью последующей оцифровкой данных позволит обеспечить прослеживаемости потребительских свойств и лежкоспособности авокадо.

Авокадо сорта Хасс характеризуется длительным сроком хранения, прекрасными вкусовыми качествами и узнаваемым внешним видом. Плоды отличаются богатым и сложным ароматическим профилем, который формируется созревания. Этот профиль является результатом

взаимодействия множества летучих органических соединений (ЛОС), которые определяют вкус и аромат плодов. Это делает плоды авокадо сорта Хасс идеальным кандидатом для разработки методов контроля качества, которые могли бы применяться в масштабах всей индустрии для онлайн контроля дозревающих плодов [1].

Аромат является ключевым индикатором при оценке потребительских предпочтений при выборе свежих плодов и овощей. Сложное сочетание летучих ароматических соединений формирует аромат плодоовощной продукции. Изучение динамики паттерна выделяемых летучих соединений, ответственных за формирование разных оттенков аромата авокадо в процессе его дозревания имеет ключевое значение при оценке качества и степени зрелости плодов в цепи поставок. Современные газовые и жидкостные хроматографы, а также масс-спектрометры, предоставляют широкие возможности для анализа и получения данных об ароматических характеристиках пищевых продуктов. Тем не менее, подобные исследования часто характеризуются высокой трудоемкостью, стоимостью и временными затратами. В связи с этим возрастает актуальность создания более доступных, экономичных устройств для быстрой оценки ароматического профиля климактерических плодов, которые позволят объективно определить степень зрелости плодов на любом этапе товародвижения [2].

В настоящее время для оперативного контроля и управления качеством плодов на этапах товародвижения большое значение уделяется разработке и широкому внедрению в практику неразрушающих экспресс-методов инструментального контроля потребительских свойств и оценки потенциальных сроков годности скоропортящейся продукции [3]. Основные тренды при разработке новых методов и приборов для неразрушающего метода анализа плодов, предполагают разработку экономичных инструментов, позволяющих проводить исследования в режиме реального времени, в одну стадию, без нарушения целостности объекта и исключая сложную процедуру пробоподготовки [4]. Значимость таких тест-систем особенно актуальна при организации импорта и реализации дорогостоящих плодов, в том числе климактерических плодов авокадо, физиологическое состояние которых постоянно изменяется в результате необратимых процессов дозревания плодов на всех этапах цепи поставок. Для инструментальной оценки легколетучих соединений, эмиссия которых коррелирует со степенью

зрелости плодов, был использован анализатор запаха МАГ-8, который позволяет формировать целостное представление об ароматическом профиле объекта. Прибор позволяет получать многомерный аналитический сигнал, отображающий матрицу данных о летучих соединениях, воспринимаемых как аромат плода, в цифровом выражении. В приборе используется набор селективных химических сенсоров на основе пьезоэлектрических кварцевых резонаторов для решения широкого спектра проблем связанных с анализом летучих химических соединений. Для оценки запаха авокадо использовали шесть перекрестно чувствительных к определенному набору летучих соединений сенсоров-датчиков, которые фиксируют особенности содержания и динамику количественных изменений исследуемых данных путем формирования визуального образа в виде диаграммы, отражающей содержание нескольких наиболее значимых компонентов, ответственных за запах. Используя консолидированное изображение можно оценивать изменение показателей, свойственных разному физиологическому состоянию плодов. Визуальные отпечатки сигналов, полученные с помощью используемого набора сенсоров-датчиков, позволили с помощью математических методов обработки ранжировать показатели в соответствии со степенью зрелости плодов [5]. Степень зрелости авокадо имеет большое значение для управления качеством и определения потенциальных сроков хранения. Различают следующие степени зрелости плодов: незрелый плод, который собран рано и не способен к дозреванию (Immature); физиологически зрелый, не достиг потребительской зрелости, пригодный для транспортирования, способен к дозреванию, (Mature green); в потребительской степени зрелости (Ripe); перезревший в стадии старения (Overripe). Для онлайн оценки состояния климактерических плодов могут использоваться интегральные методы диагностики летучих ароматических соединений, сосав которых имеет характерный спектр для каждой стадии зрелости. В этой связи в данной работе была изучена эффективность применения анализатора запахов МАГ-8 для определения визуальных отпечатков сигналов, измеренных в равновесной газовой фазе над образцами, с помощью рекомендуемого набора шести сенсоров-датчиков и последующей их математической обработки.

Приборы и алгоритмы с методологией «Электронный нос» могут стать ценным инструментом для управления качеством авокадо на различных этапах товародвижения, в том числе за счет быстрого анализа зрелости.

Внедрение этой технологии позволит повысить эффективность контроля качества и снизить потери, связанные с порчей продукции.

Цель работы – оценка возможности применения разноселективного массива пьезокварцевых сенсоров для разработки экспрессного неразрушающего способа оценки степени зрелости плодов авокадо, как ключевого фактора позволяющего минимизировать потери продукции на всех этапах цепи поставок.

Материалы и методы

Для исследования летучих органических веществ была использована методика, основанная на сенсорной технологии, имитирующей принципы работы человеческого обоняния. Для контроля изменения состава смеси летучих соединений, выделяющихся через кожуру плодов авокадо сорта Хасс разной степени спелости применяли анализатор газов «МАГ-8» с набором в качестве детектирующих элементов шести пьезосенсоров и закрытой ячейкой детектирования (Россия, ООО «Сенсорика – Новые Технологии»). В работе применялись 6 сенсоров на базе пьезокварцевых резонаторов с основной частотой колебаний 10,0–14,0 МГц с различными по составу и свойствам пленочными наноструктурированными сорбентами, нанесенными на электроды [6]. Выбор покрытий был обусловлен целью исследований (потенциальной эмиссией различных органических соединений из пищевых систем): сенсор 1, электрод на основе поливинилпирролидона (ПВП) (универсальные покрытия), модифицирован многослойными углеродными карбоксилированными нанотрубками разной массы для обеспечения разной чувствительности микровзвешивания паров полярных ЛОС: спирты, кислоты, фенолы, ацетон и формальдегид [8]. Сенсор 2 – в качестве покрытия используется наногидроксиапатит (н-ГА), который имеет высокое сродство к реакционно-способным молекулам, такими как кислоты, формальдегид, спирты, аммиак и амины [9]. Сенсор 3 покрыт пленкой фазы дициклогексан-18-краун-6, селективно связывает пары аммиака, низкомолекулярные амины и ацетонитрил за счёт образования комплексов «гость-хозяин» [7]. Сенсор 4 с наноструктурированным полиэтиленгликолядипипината (ПЭГА) сорбирует широкий спектр соединений – от полярных спиртов и кислот до кетонов, эфиров и ароматических углеводов. 5 сенсор покрыт полиэтиленгликоль сукцинатом и проявляет повышенное сродство к основным Л.О.С. (аммиак, амины), а также к формальдегиду, спиртам и кислотам [10].

Сенсор 6 – покрыт тритоном X-100, как амфифильным сорбентом, взаимодействует с гидрофильной частью Л.О.С. со спиртами и гликолями, а также гидрофобной – с ароматическими и хлорированными углеводородами [11].

Используемый метод позволяет получить характерный отпечаток изучаемой смеси летучих ароматических веществ, без разделения и индивидуальной их идентификации. Регистрация эффектов обратимого неспецифического взаимодействия сенсоров с многокомпонентными смесями летучих соединений (Л.С.) выраженных, в виде численных значений и сигналов сенсоров используется для регистрации, оцифровки состава уникальной смеси. Сопоставление и ранжирование многомерных данных, полученных от используемого массива сенсоров в приборе, позволяет принимать решение об изменениях состава и количества ароматических веществ, вызванных процессами созревания исследуемых плодов. Этот подход позволяет создавать уникальные "отпечатки пальцев" для различных веществ и смесей, что обеспечивает возможность их идентификации, аутентификации и классификации. В процессе работы массивов сенсоров происходит непрерывный мониторинг сигналов от каждого измерительного элемента. Эти сигналы представляют собой аналоговые величины, такие как напряжение, ток или частота колебаний. Полученные аналоговые сигналы преобразуются в цифровые данные с помощью аналого-цифрового преобразователя (А.Ц.П.). Цифровые данные, соответствующие отклику каждого сенсора на воздействие газовой смеси, формируют вектор отклика, который является уникальным "отпечатком пальца" этой смеси.

Обработка полученных данных является критически важным этапом, позволяющим извлечь полезную информацию о составе и концентрации анализируемых веществ. Для этой цели используются различные методы статистического анализа и машинного обучения.

Для идентификации и классификации полученных результатов наиболее эффективным является алгоритм, основанный на максимальных значениях откликов отдельных сенсоров (визуальные проекции максимальных сигналов). Погрешность измерений сигналов не превышает 5%.

Суммарный аналитический сигнал массива сенсоров представлен количественными параметрами:

1) ΣS – общая площадь "визуального отпечатка", ($\Gamma \text{ц}^* \text{с}$) отражающая суммарную

интенсивность запаха, соответствующая концентрации летучих веществ. Этот параметр рассчитывается на основе сигналов всех сенсоров за весь период измерения и является суммой площадей под выходными кривыми сорбции ароматических веществ сенсоров при замере.

2) определение максимальных значений сигналов, которые образуются на наиболее чувствительных сенсорах со специфическим покрытием, адаптированных к определенным летучим веществам – ΔF_{max} ($\Gamma \text{ц}$), они используются для определения суммарного содержания определенных классов органических соединений в равновесной газовой фазе над плодами авокадо (Р.Г.Ф.).

Используя количественный метод нормализации результатов исследования, были определены показатели нормализации суммарной площади ($\Gamma \text{ц}$), позволяющие проводить систематизацию полученных результатов. Указанные характеристики были зарегистрированы, обработаны и сопоставлены с использованием специализированного программного обеспечения анализатора «MAG Soft».

Для идентификации отдельных классов веществ в смеси и сопоставления стабильности качественного состава смесей Л.С. используются параметры парной чувствительности $A_{i/j}$, вычисляемые как частное максимальных сигналов двух сенсоров. Новым подходом к сравнению качественного состава запаха проб или их компонентов является сопоставление набора наиболее стабильных и информативных параметров, т. е. тех, которые существенно различаются для разных типов проб. Степень схожести состава летучих компонентов образцов оценивается по доле параметров, совпадающих в пределах допустимой погрешности. Образцы считаются обладающими схожим (идентичным) ароматом, если различие не превышает 30% по параметрам.

Для сравнения всей матрицы данных (качественных и количественных) для каждого образца применялся метод сжатия облака чисел в точку по авторскому алгоритму [6].

Для эксперимента были отобраны не спелые (Immature) плоды авокадо сорта Хасс. Плоды разделили на 11 вариантов, однородных по качеству и спелости зрелости плодов: 3 варианта – исследовались на стадии зрелости – «не спелые плоды»; 5 вариантов – в степени зрелости – «спелые плоды» и 3 варианта – в степени зрелости «перезрелые» плоды таблица 1.

Таблица 1.

Средние значимые отклики сенсоров (ΔF_{max} , Гц) в парах РГФ над плодами авокадо, n=5, p=0,95

Table 1.

Average significant sensor responses (ΔF_{max} , Hz) in RGF pairs over avocado fruits, n=5, p=0.95

Варианты опыта Sample	Максимальные значения сигналов на сенсоре, Гц Maximum sensor signal values, Hz						Нормированная суммарная площадь, Гц*.с Normalized total area, Hz*.s
	Сенсор 1, ПВП	Сенсор 2, ГА	Сенсор 3, ДЦГ 186К	Сенсор 4, ПЭГА	Сенсор 5, ПЭГСук	Сенсор 6, ТХ-100	
«Не спелые»							
№ 1	10	15	40	10	10	19	0,11
№ 2	10	16	41	10	12	21	0,18
№ 3	11	18	44	10	12	20	0,22
«Спелые»							
№ 4	15	23	57	14	14	27	0,71
№ 5	16	23	56	15	16	28	0,67
№ 6	15	21	54	15	15	26	0,66
№ 7	14	21	54	17	19	28	0,75
№ 8	13	22	58	16	16	25	0,76
«Перезрелые»							
№ 9	19	26	74	21	22	31	1,20
№ 10	23	32	79	21	18	35	1,02
№ 11	22	30	80	20	17	33	1,21

Плоды закладывали на хранение для дозревания при комнатной температуре (20 ± 5) °С, на протяжении двух недель. Каждые сутки проводился анализ равновесной газовой фазы в каждом варианте отобранных плодов. Измерения проводились дважды для каждой пробы с получасовым интервалом, с отбором Р.Г.Ф. над плодами по мере постепенного созревания плодов авокадо по схеме mature green → ripe → overripe степени зрелости, на приборе МАГ-8. Индивидуальным шприцем отбирали по 5 см³ Р.Г.Ф. не касаясь кожицы плода и инжигировали в ячейку детектирования прибора, одновременно запуская регистрацию откликов сенсоров и фиксировали аналитические сигналы массива 6 сенсоров. После измерения ячейку

кратковременно продували свежим воздухом и контролировали восстановление базовых значений сенсоров. Параллельно с регистрацией сигналов сенсоров в Р.Г.Ф. над плодами, проводили контрольное измерение при отсутствии в ячейке плодов. Каждый образец тестировали не менее, чем в 3–5-ти кратной повторности. Параллельно, с помощью органолептических и физико-химических методов определяли показатели, характеризующие степень зрелости плодов по показателям цвет, аромат, консистенция, твердость, содержание сахаров и дифференцировали плоды по полученным результатам на категории: «Не спелые», «Спелые», «Перезрелые» средние значения представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Зависимость степени зрелости от маркеров физиологического состояния плодов

Table 2.

The dependence of the degree of maturity on markers of the physiological state of fruits

Варианты опыта Sample	Цветовые характеристики a*b Color characteristics a*b	Содержание сахара, Brix, % Sugar content, Brix, %	Твердость мякоти, кг/см ² Pulp firmness, kg/cm ²	Интенсивность дыхания, мг CO ₂ /кг·ч Respiration rate, mg CO ₂ /kg h	Интенсивность выделения этилена, ppm Ethylene emission rate, ppm
«Не спелые»					
№ 1	a= -5,6; b=12,5	10,0	25	1313	5
№ 2	a= -4; b=11,8	10,5	22	1326	25
№ 3	a= -3,9; b=6,3	11,9	18	1337	27
«Спелые»					
№ 4	a= -3; b=5,2	12,8	16	1344	33
№ 5	a= -2,5; b=4,7	14,7	8	1346	52
№ 6	a= -1,7; b=4,2	14,9	6	1349	61
№ 7	a= -1,5; b=4	14	5	1356	94
№ 8	a= -1; b=3,9	13,8	4	1378	117
«Перезрелые»					
№ 9	a=0,5; b=3,6	13,2	3	1422	128
№ 10	a=1; b=3,4	13	2	1470	1331
№ 11	a=1,2; b=3,2	12,9	1	1485	135

Результаты

Результаты тестирования для оценки вариабельности состава равновесной газовой фазы над плодами авокадо и анализ подтверждения схожести полученных сигналов детекторов представлены в таблице 1. Анализируя максимальные значения сигналов на 6 сенсорах, было установлено, что диапазон максимальных значений для каждого сенсора коррелирует со степенью зрелости плодов. Наиболее чувствительными сенсорами к химическому составу Л.С. авокадо были 2, 3 и 6 сенсоры. По мере созревания плодов от неспелого состояния (образцы 1–3), к спелому плоду (образцы 4–8) и перезрелые плоды (образцы 9–11) происходит значимое увеличение максимального значения на каждом сенсоре. На основании данных значений для каждого выделенного по чувствительности сенсора, установлены характерные диапазоны значений, соответствующий определенной степени зрелости плодов и установлена корреляция данных с данными физико-химических анализов плодов для каждой степени зрелости в таблице 2.

Используя количественный метод нормализации результатов исследования, были определены показатели нормализации суммарной площади (Гц), представленные в таблице 1. Полученные данные позволяют ранжировать диапазоны значений, соответствующие разным степеням зрелости плодов авокадо. Диапазон значений от 0,11 до 0,22 Гц*с – соответствует плодам незрелым, но способным к дозреванию. Значения от 0,66 до 0,76 Гц*с соответствуют плодам в стадии «готов к употреблению». Значения для перезрелых плодов находятся в диапазоне 1,02–1,21 Гц*с. Данные характеристики были зарегистрированы и обработаны с использованием программного обеспечения анализатора «MAG Soft».

Для дальнейших расчетов выбраны только статистически значимые сигналы сенсоров в массиве. Максимальные отклики и суммарная площадь под выходными кривыми сенсоров являются в первом приближении критериями количественной оценки смеси Л.С. в Р.Г.Ф., подтверждающие количественное увеличение сигналов сенсоров при переходе от одной категории спелости плодов к последующей группе. Известно, что сложные эфиры, такие как этилбутаноат и метилбензоат, а также альдегид Е-2-гексеналь, формируют характерный аромат и вкус авокадо" [12]. Их накопление в процессе созревания, объясняет появление выраженного роста значений откликов сенсоров с полярными сорбентами.

Обсуждение

Ранее также была показана роль четырех основных сложных эфиров (метилбутаноата, метилбензоата, этилбутаноата и этилбензоата) в созревании авокадо сорта «Фуерте» [13]. Эфиры со сладким и фруктовым запахом образуются в результате этерификации карбоновых кислот и спиртов. Эфиры низших карбоновых кислот и низших одноатомных спиртов имеют приятный запах цветов, ягод и фруктов. Аромат созревающих плодов авокадо обогащается за счет синтеза многоатомных спиртов, со свойственным авокадо запахом. Так, приятный фруктовый аромат обусловлен присутствием нормальных спиртов С5-С6. Спирты с фруктовыми цветочными запахами в основном формируются в результате окисления и разложения липидов. Определенную роль в формировании аромата плодов авокадо играют карбонильные соединения, придающие ему оттенки травянистой зелени и свежести. Благодаря накоплению при созревании бензальдегиду, гептанолу, уксусному альдегиду, мякоть плодов приобретает тонкий сладковатый аромат. Сенсорная характеристика карбонильных соединений разнообразна и зависит от их концентрации в субстрате, многие из этих соединений имеют сильный запах в концентрациях близких к пороговым при традиционной органолептической оценке. Сладковатые нотки в общий аромат плодов вносят также простейшие ароматические углеводороды. В незрелых фруктах содержится больше альдегидов, которые придают аромату зелёные нотки. В спелых авокадо – больше сложных эфиров и спиртов, которые отвечают за фруктовый аромат. Эти данные объясняют реакцию сенсоров на изменения в процессе созревания плодов и накопление соединений, приводящих к увеличению количественных характеристик пьезокварцевого микровзвешивания Р.Г.Ф. над плодами с выбранными сенсорами. При созревании плоды авокадо выделяют набор Л.О.С., которые сенсоры способны сорбировать в зависимости от химического состава и структуры.

Для оценки значимых отличий в количественном составе смеси Л.С., выделяемых авокадо, применим авторский алгоритм многомерной обработки данных «Coloristic». Для выравнивания чувствительности сенсоров к Л.С., средние отклики сенсоров, суммарная площадь под хронототограммами при нагрузке пронормированы с учетом заданной нами 15%-ной вариации верхнего и нижнего предела нормирования. Далее полученным значениям присвоены цветовые коды согласно статистически обоснованным границам для применяемого набора сенсоров в таблице 3.

Таблица 3.

Основа для цветового кодирования данных массива сенсоров

Table 3.

The basis for color coding of sensor array data

Номер диапазона Range number	Минимальная граница Minimum limit	Максимальная граница Maximum limit	Цвет кодирования Color coding
1	0,00	0,104	фиолетовый
2	0,105	0,204	синий
3	0,205	0,314	голубой
4	0,315	0,454	зеленый
5	0,455	0,594	желтый
6	0,595	0,804	оранжевый
7	0,805	0,954	красный
8	0,955	2,04	бордовый
9	2,1	5,0	черный

Полученные цветовые метки обрабатывались в доступном программном ресурсе (<https://get-color.ru/color-mixer/>) и были получены итоговые интегральные цветовые точки с координатами в системе RGB в таблице 4, которые вносились в трехмерное цветовое пространство на рисунке 1. Применяемый алгоритм стягивания многомерного набора данных позволил получить четко разделенные группы точек для средних значений данных для плодов авокадо из разных групп по степени зрелости.

Таблица 4.

Характерные диапазоны изменения координат цветовых интегральных меток в RGB-пространстве для ранжирования плодов авокадо сорта Хасс по спелости

Table 4.

Характерные диапазоны изменения координат цветовых интегральных меток в RGB-пространстве для ранжирования плодов авокадо сорта Хасс по спелости

Группы спелости Group	R-канал		G-канал		B-канал	
	min	max	min	max	min	max
«Не спелые»	0*	80	90	260	45	210
«Спелые»	90	250	170	260	0	85
«Переспелые»	130	240	60	160	0	35

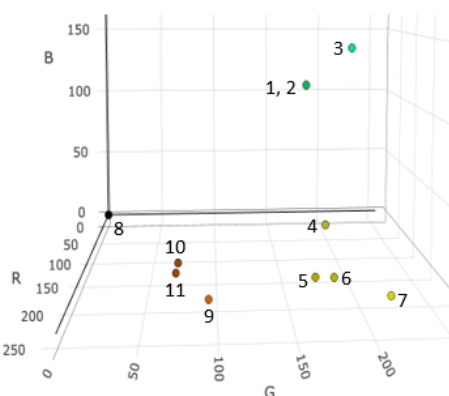


Рисунок 1. Интегральные метки средних количественных параметров массива сенсоров в РГФ над образцами авокадо групп «Не спелые» (1–3), «Спелые» (4–8), «Перезрелые» (9–11).

Figure 1. Integral labels of the average quantitative parameters of the sensor array in the RGF over avocado samples of the groups "Not ripe" (1–3), "Ripe" (4–8), "Overripe" (9–11).

На рисунке 2 показано, что для всех измерений Р.Г.Ф. над плодами из выборки «Не спелые» минимален вклад красной составляющей координаты интегральной цветовой метки, все точки имеют синие и сине-зеленые оттенки, что свидетельствует о статистически значимом отличии состава Р.Г.Ф. над плодами разной степени зрелости.

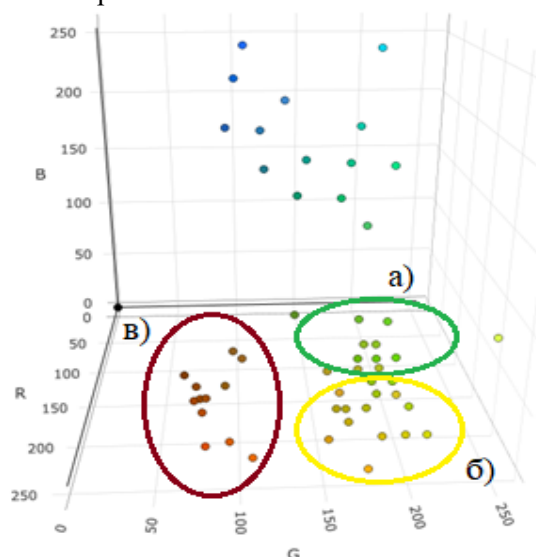


Рисунок 2. Проекция интегральных меток для точечных измерений сигналов сенсоров в Р.Г.Ф. над плодами авокадо из группы «Не спелые» (а), «Спелые» (б), «Перезрелые» (в) и всех групп вместе (г)

Figure 2. Projections of integral labels for point measurements of sensor signals in the RGF over avocado fruits from the "Unripe" (a), "Ripe" (b), "Overripe" (c) and all groups together (d) groups

На рисунке 3 представлены координаты интегральных меток средних значений параметров качественного и количественного состава Л.С. в Р.Г.Ф. над пробами из разных выборок: неспелые (1–3), спелые (4–8), перезрелые (9–11) плоды авокадо. Более однородной по цвету является выборка интегральных цветковых меток для проб, выделенных в группу «Спелые». Это свидетельствует об изменении состава Р.Г.Ф. над образцами за счет выделения большего числа соединений, коррелирующих с усилением аромата.

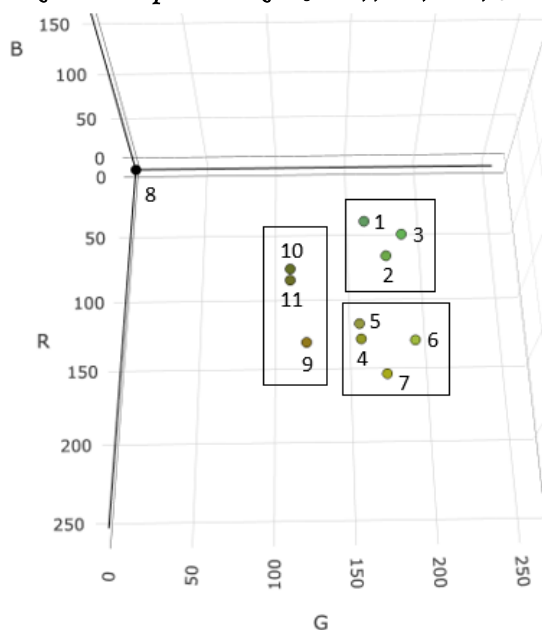


Рисунок 3. Координаты интегральных меток средних значений параметров качественного и количественного состава Л.С. в Р.Г.Ф. над пробами из разных выборок: незрелые (1–3), Спелые (4–8), перезрелые (9–11) плоды авокадо

Figure 3. The coordinates of the integral labels of the average values of the parameters of the qualitative and quantitative composition of drugs in the RGF over samples from different samples: unripe (1–3), Ripe (4–8), overripe (9–11) avocado fruits

Существенно отличается от плодов не спелых аромат плодов группы «Переспелые». Это показывает, что массив сенсоров «электронного носа» адекватно отражает изменения в аромате плодов авокадо в процессе созревания. При этом различия в расположении интегральных цветовых меток связаны не только с изменениями количественного состава, соотношения в смеси отдельных групп соединений, но и появлению более тяжелых Л.С., которые даже в малых концентрациях вызывают заметное изменение аналитического сигнала пьезосенсоров, прямо пропорционального массе сорбированных покрытиями летучих молекул.

Заключение

В результате проведенного исследования установлена высокая эффективность применения массива пьезоэлектрических сенсоров с разнонаправленной селективностью для задачи экспресс-мониторинга физиологического

состояния плодов авокадо (*Persea americana*) сорта Хасс. Интеграция технологии «электронного носа», реализованной на базе анализатора МАГ-8, обеспечивает трансформацию субъективных органолептических оценок степени зрелости плодов в область объективных количественных данных. Данный подход позволяет осуществлять непрерывный контроль качества продукции на ключевых этапах логистической цепи, транспортирования и последующей реализации. Разработанный аналитический протокол, включающий алгоритмы многомерной статистической обработки первичных сигналов и их визуализацию через систему цветовых координат RGB, формирует устойчивую классификационную модель. Модель обеспечивает надежное дифференцирование образцов по трем категориям зрелости: незрелые, готовые к употреблению и перезрелые. Реализация такой системы классификации является критически важным фактором для минимизации экономических потерь, обусловленных порчей скоропортящейся продукции в рамках поставок.

Экспериментальные данные демонстрируют наличие выраженной корреляции между динамикой паттерна Л.О.С., выделяемых плодом, и его физиологическим статусом на различных стадиях постуборочного дозревания. Анализ информативности различных параметров показал, что для оперативной диагностики наиболее целесообразно использование прямых показателей откликов сенсоров и значений интегральной площади под выходными кривыми. Применение этих показателей существенно упрощает процедуру принятия решения, исключая необходимость в вычислениях более сложных, избыточных параметров, таких как коэффициенты парной чувствительности.

Таким образом, представленный неразрушающий метод экспресс-анализа равновесной газовой фазы над поверхностью плода обладает высокой чувствительностью к микроколичественным изменениям в его ароматическом профиле. Эти изменения являются прямым следствием метаболических процессов, связанных с созреванием. Разработанный аналитический инструментарий в полной мере отвечает современным промышленным требованиям, выдвигаемым к системам контроля качества в агрологистике.

Литература

- 1 Николаева М.А., Елисеева Л.Г., Раков Н.О. и др. Пищевая ценность и товарное качество плодов авокадо // Пищевая промышленность. 2025. № 4. С. 78–82. doi: 10.52653/PPI.2025.4.4.014
- 2 Елисеева Л.Г., Николаева М.А., Токарев П.И. и др. Состояние и перспективы развития рынка авокадо // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2025. № 2 (91). С. 97–105. doi: 10.33979/2219-8466-2025-91-2-97-105
- 3 Sa I., Ge Z., Dayoub F., Upcroft B. et al. DeepFruits: a fruit detection system using deep neural networks // Sensors. 2016. Vol. 16. No. 8. Article 1222. doi: 10.3390/s16081222

- 4 Wang J., Teng B., Yu Y. et al. Prediction of shelf life and quality of fruits using data fusion and machine learning: a review // *Trends in Food Science & Technology*. 2022. Vol. 125. P. 200–215.
- 5 Kuchmenko T.A. Electronic nose based on nanoweights, expectation and reality // *Pure and Applied Chemistry*. 2017. Vol. 89. No. 10. P. 1587–1601. doi: 10.1515/pac-2016-1108
- 6 Kuchmenko T.A., Lvova L.B. A perspective on recent advances in piezoelectric chemical sensors for environmental monitoring and foodstuffs analysis // *Chemosensors*. 2019. Vol. 7. No. 3. Article 39. doi: 10.3390/chemosensors7030039
- 7 Ле-Дейген И.М., Фам Тхи Лан, Скуредина А.А., Марков П.О. и др. Механизм образования комплексов типа «гость-хозяин» между рутином и 2-гидроксипропил-бета-циклодекстрином // *Вестник Московского университета. Сер. 2. Химия*. 2025. Т. 66. № 1. С. 67–71.
- 8 Краснюк И.И., Беляцкая А.В., Краснюк И.И., Степанова О.И. и др. Перспективы применения твердых дисперсий с поливинилпирролидоном в медицине и фармации // *Фармация*. 2016. № 6. С. 7–11.
- 9 Balasooriya I.L., Chen J., Korale Gedara S.M., Han Y. et al. Applications of nano hydroxyapatite as adsorbents: a review // *Nanomaterials*. 2022. Vol. 12. No. 14. Article 2324. doi: 10.3390/nano12142324
- 10 López-de-Dicastillo C., López-Carballo G., Vázquez P. et al. Designing an oxygen scavenger multilayer system including volatile organic compound (VOC) adsorbents for potential use in food packaging // *Polymers*. 2023. Vol. 15. No. 19. Article 3899. doi: 10.3390/polym15193899
- 11 Tarighat M.A., Behroozi A., Abdi G., Proestos C. Multivariate simultaneous determination of some PAHs in Persian Gulf oil-contaminated algae and water samples using miniaturized Triton X-100-mediated Fe₃O₄ nanoadsorbent and UV-Vis detection // *Separations*. 2023. Vol. 10. No. 6. Article 334. doi: 10.3390/separations10060334
- 12 Chen J., Zhu F. Characterization of physicochemical properties, fatty acids, flavor volatiles and phenolic compounds of avocado varieties // *Food Chemistry*. 2025. Vol. 482. Article 143533. doi: 10.1016/j.foodchem.2025.143533
- 13 Mahendran T., Brennan J.G., Hariharan G. Aroma volatiles components of 'Fuerte' avocado (*Persea americana* Mill.) stored under different modified atmospheric conditions // *Journal of Essential Oil Research*. 2019. Vol. 31. No. 1. P. 34–42. doi: 10.1080/10412905.2018.1495108
- 14 Baietto M., Wilson A.D. Electronic-nose applications for fruit identification, ripeness, and quality grading // *Sensors*. 2015. Vol. 15. No. 1. P. 899–931. doi: 10.3390/s150100899
- 15 Sanaeifar A., ZakiDizaji H., Jafari A., de la Guardia M. Early detection of contamination and defect in foodstuffs by electronic nose: a review // *Trends in Analytical Chemistry*. 2017. Vol. 97. P. 257–271. doi: 10.1016/j.trac.2017.09.014
- 16 Rodríguez P., Soto I., Villamizar J., Rebolledo A. Fatty acids and minerals as markers useful to classify Hass avocado quality: ripening patterns, internal disorders, and sensory quality // *Horticulturae*. 2023. Vol. 9. No. 4. Article 460. doi: 10.3390/horticulturae9040460
- 17 Hu J., Liu D., Zhu Y., Chen Z. et al. Establishing a maturity prediction model for respiratory fruits via ethylene-regulated physiology: a case investigation of avocado // *Food Bioscience*. 2024. Vol. 59. Article 104097. doi: 10.1016/j.fbio.2024.104097
- 18 Pateraki A., Pollo B.J., Augusto F., Psillakis E. Vacuum-assisted headspace solid-phase microextraction for volatile profiling of avocado puree: application to post-harvest ripening // *Journal of Chromatography Open*. 2025. Vol. 8. Article 100274. doi: 10.1016/j.jcoa.2025.100274
- 19 Betancourt-Arango E., Arango-Muñoz Y., Osorio-Tobón J.F. et al. Volatilomic analysis in peel, pulp and seed of Hass avocado (*Persea americana* Mill.) by gas chromatography with mass spectrometry // *Food Science & Nutrition*. 2025. Vol. 13. Article e70489. doi: 10.1002/fsn3.70489
- 20 Yahia E.M., Ramos-Aguilar A.L., Ornelas-Paz J. et al. Identification and characterization of phytochemicals in avocado (*Persea americana* Mill., var. Hass) fruit at different maturation and ripening stages // *Journal of Food Quality*. 2025. Vol. 2025. Article 7181926. doi: 10.1155/jfq/7181926

References

- 1 Nikolaeva M.A., Eliseeva L.G., Rakov N.O. et al. Nutritional value and commercial quality of avocado fruits. *Food Industry*. 2025. no. 4. pp. 78–82. doi: 10.52653/PPI.2025.4.4.014 (in Russian).
- 2 Eliseeva L.G., Nikolaeva M.A., Tokarev P.I. et al. State and prospects for the development of the avocado market. *Technology and Merchandising of Innovative Food Products*. 2025. no. 2 (91). pp. 97–105. doi: 10.33979/2219-8466-2025-91-2-97-105 (in Russian).
- 3 Sa I., Ge Z., Dayoub F., Upcroft B. et al. DeepFruits: a fruit detection system using deep neural networks. *Sensors*. 2016. vol. 16. no. 8. article 1222. doi: 10.3390/s16081222.
- 4 Wang J., Teng B., Yu Y. et al. Prediction of shelf life and quality of fruits using data fusion and machine learning: a review. *Trends in Food Science & Technology*. 2022. vol. 125. pp. 200–215. doi: 10.1016/j.tifs.2022.05.008.
- 5 Kuchmenko T.A. Electronic nose based on nanoweights, expectation and reality. *Pure and Applied Chemistry*. 2017. vol. 89. no. 10. pp. 1587–1601. doi: 10.1515/pac-2016-1108.
- 6 Kuchmenko T.A., Lvova L.B. A perspective on recent advances in piezoelectric chemical sensors for environmental monitoring and foodstuffs analysis. *Chemosensors*. 2019. vol. 7. no. 3. article 39. doi: 10.3390/chemosensors7030039.
- 7 Le-Deigen I.M., Pham Thi Lan, Skuredina A.A., Markov P.O. et al. Mechanism of formation of "guest-host" complexes between rutin and 2-hydroxypropyl-beta-cyclodextrin. *Bulletin of Moscow University. Series 2. Chemistry*. 2025. vol. 66. no. 1. pp. 67–71. (in Russian).
- 8 Krasnyuk I.I., Belyatskaya A.V., Krasnyuk I.I., Stepanova O.I. et al. Prospects for the use of solid dispersions with polyvinylpyrrolidone in medicine and pharmacy. *Pharmacy*. 2016. no. 6. pp. 7–11. (in Russian).
- 9 Balasooriya I.L., Chen J., Korale Gedara S.M., Han Y. et al. Applications of nano hydroxyapatite as adsorbents: a review. *Nanomaterials*. 2022. vol. 12. no. 14. article 2324. doi: 10.3390/nano12142324.
- 10 López-de-Dicastillo C., López-Carballo G., Vázquez P. et al. Designing an oxygen scavenger multilayer system including volatile organic compound (VOC) adsorbents for potential use in food packaging. *Polymers*. 2023. vol. 15. no. 19. article 3899. doi: 10.3390/polym15193899.

11 Taright M.A., Behrooz A., Abdi G., Proestos C. Multivariate simultaneous determination of some PAHs in Persian Gulf oil-contaminated algae and water samples using miniaturized Triton X-100-mediated Fe₃O₄ nanoadsorbent and UV-Vis detection. *Separations*. 2023. vol. 10. no. 6. article 334. doi: 10.3390/separations10060334.

12 Chen J., Zhu F. Characterization of physicochemical properties, fatty acids, flavor volatiles and phenolic compounds of avocado varieties. *Food Chemistry*. 2025. vol. 482. article 143533. doi: 10.1016/j.foodchem.2025.143533.

13 Mahendran T., Brennan J.G., Hariharan G. Aroma volatiles components of 'Fuerte' avocado (*Persea americana* Mill.) stored under different modified atmospheric conditions. *Journal of Essential Oil Research*. 2019. vol. 31. no. 1. pp. 34–42. doi: 10.1080/10412905.2018.1495108.

14 Baietto M., Wilson A.D. Electronic-nose applications for fruit identification, ripeness, and quality grading. *Sensors*. 2015. vol. 15. no. 1. pp. 899–931. doi: 10.3390/s150100899.

15 Sanaeifar A., ZakiDizaji H., Jafari A., de la Guardia M. Early detection of contamination and defect in foodstuffs by electronic nose: a review. *Trends in Analytical Chemistry*. 2017. vol. 97. pp. 257–271. doi: 10.1016/j.trac.2017.09.014.

16 Rodríguez P., Soto I., Villamizar J., Rebolledo A. Fatty acids and minerals as markers useful to classify Hass avocado quality: ripening patterns, internal disorders, and sensory quality. *Horticulturae*. 2023. vol. 9. no. 4. article 460. doi: 10.3390/horticulturae9040460.

17 Hu J., Liu D., Zhu Y., Chen Z. et al. Establishing a maturity prediction model for respiratory fruits via ethylene-regulated physiology: a case investigation of avocado. *Food Bioscience*. 2024. vol. 59. article 104097. doi: 10.1016/j.fbio.2024.104097.


18 Pateraki A., Pollo B.J., Augusto F., Psillakis E. Vacuum-assisted headspace solid-phase microextraction for volatile profiling of avocado puree: application to post-harvest ripening. *Journal of Chromatography Open*. 2025. vol. 8. article 100274. doi: 10.1016/j.jcoa.2025.100274.

19 Betancourt-Arango E., Arango-Muñoz Y., Osorio-Tobón J.F. et al. Volatilomic analysis in peel, pulp and seed of Hass avocado (*Persea americana* Mill.) by gas chromatography with mass spectrometry. *Food Science & Nutrition*. 2025. vol. 13. article e70489. doi: 10.1002/fsn3.70489.

20 Yahia E.M., Ramos-Aguilar A.L., Ornelas-Paz J. et al. Identification and characterization of phytochemicals in avocado (*Persea americana* Mill., var. Hass) fruit at different maturation and ripening stages. *Journal of Food Quality*. 2025. vol. 2025. article 7181926. doi: 10.1155/jfq/7181926

Сведения об авторах


Никита О. Раков аспирант, базовая кафедра индустрии качества, Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Стремянный переулок, д. 36, г. Москва, 109992, Россия, nikitarakovv@yandex.ru

 <https://orcid.org/0009-0000-2001-6868>

Людмила Г. Елисеева д.т.н., профессор, базовая кафедра индустрии качества, Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова, Стремянный переулок, д. 36, г. Москва, 109992, Россия, eliseeva-reu@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2715-9989>

Татьяна А. Кумченко д.х.н., профессор, кафедра физической и аналитической химии, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, tak1907@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7812-9195>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors


Nikita O. Rakov Postgraduate Student, Basic Department of Quality Industry, Plekhanov Russian University of Economics, 36 Stremyanny Lane, Moscow, 109992, Russia, nikitarakovv@yandex.ru

 <https://orcid.org/0009-0000-2001-6868>

Ljudmila G. Eliseeva Dr. Sci (Tech.), Professor, Professor of the Basic Department of Quality Industry, Plekhanov Russian University of Economics, 36 Stremyanny Lane, Moscow, 109992, Russia, eliseeva-reu@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2715-9989>

Tatiana A. Kumchenko Dr. Sci. (Chem.), professor, physical and analytical chemistry department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, tak1907@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7812-9195>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 16/03/2026	После редакции 20/04/2026	Принята в печать 11/05/2026
Received 16/03/2026	Accepted in revised 20/04/2026	Accepted 11/05/2026