

Интеллектуальная упаковка для овощей и фруктов, классификация и перспективы использования: Обзор предметного поля

Л.Ч. Бурак, А.Н. Сапач, М.И. Писарик

ООО «БЕЛПРОСАКВА»,
Республика Беларусь

Корреспонденция:

Бурак Леонид Чеславович
ООО «Белпросаква»,
220015, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Пономаренко, 35а
E-mail: leonidburak@gmail.com

Конфликт интересов:

авторы сообщают об отсутствии
конфликта интересов

Поступила: 07.04.2023

Поступила после
рецензирования: 30.05.2023

Принята: 31.05.2023

Copyright: © 2023 Авторы

АННОТАЦИЯ

Введение. Упаковка пищевых продуктов имеет важное значение для предотвращения загрязнения пищевых продуктов химическими веществами, физического повреждения, пыли, воздействия температуры, света, влажности и микроорганизмов.

Цель статьи выполнить обзор интеллектуальных методов упаковки фруктов и овощей, анализ последних достижений в области целевых метаболитов, которые применяют для обнаружения в интеллектуальной упаковке.

Материалы и методы. В обзор включены зарубежные статьи опубликованные на английском языке за период 2010–2022 год. Поиск зарубежной научной литературы проводили в библиографических базах Google Scholar, Scopus, Web of Science, Elsevier, ResearchGate. При отборе публикаций для обзора приоритет отдавали высокоцитируемым источникам.

Результаты. Установлено, что интеллектуальные упаковочные системы применяются для мониторинга в режиме реального времени фруктов и овощей, мясных и молочных продуктов в цепочке поставок, посредством взаимодействия между небольшими компонентами внутри упаковки, такими как колориметрические индикаторные этикетки, датчики и целевые ответчики для предоставления информации о качестве продукта и параметрах окружающей среды.

Выводы. Несмотря на преимущества инновационной упаковки, включающей в себя повышение эффективности использования продуктов и пищевого сырья и минимизацию отходов, существуют проблемы, препятствующие широкому промышленному внедрению данной упаковки для фруктов и овощей. В первую очередь необходимо учитывать безопасность интеллектуальных компонентов упаковки, включая миграцию химических красителей в колориметрических индикаторных этикетках и химических датчиках, а также возможность химического взаимодействия между интеллектуальными упаковочными материалами и пищевыми компонентами. В настоящее время производство интеллектуальной упаковки для фруктов и овощей сосредоточено в основном в небольших лабораториях и не учитывает производственные затраты. Для снижения стоимости интеллектуальных упаковочных материалов и обработки необходимы дальнейшие научные изыскания и более глубокие исследования. Кроме того, в дальнейшем необходимо решать вопросы, связанные с оценкой безопасности, правовым регулированием, управлением затратами и другими факторами, с целью максимального использования интеллектуальной упаковки в условиях промышленного производства и реализации продуктов потребителю.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

упаковка, интеллектуальная упаковка, индикаторные этикетки, пленки, датчики, биосенсоры, наночастицы



Для цитирования: Бурак, Л. Ч., Сапач, А. Н., & Писарик, М. И. (2023). Интеллектуальная упаковка для овощей и фруктов, классификация и перспективы использования. *Health, Food & Biotechnology*, 5(1), 51–80. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i1.s165>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i1.s165>

Intelligent Packaging For Vegetables And Fruits, Classification And Use Prospects: Scoping Review

Leonid Ch. Burak , Aleksandr N. Sapach , Maksim I. Pisarik

LLC "BELROSAKVA", Republic of Belarus

Correspondence:

Leonid Ch. Burak,
Belrosakva LLC, 35a, Ponomarevko St.,
Minsk, 220015, Republic of Belarus
E-mail: leonidburak@gmail.com

Declaration of competing interest:
none declared.

Received: 07.04.2023

Received in revised form: 30.05.2023

Accepted: 31.05.2023

Copyright: © 2023 The Authors

ABSTRACT

Introduction. Vegetables and fruits are subject to deterioration in quality due to their metabolism and adverse environmental influences. The physiological and compositional changes that occur during post-harvest storage create additional opportunities for microbial contamination, which is another key element of quality degradation. Therefore, the development of economical post-harvest technologies to reduce spoilage is of ongoing interest to researchers. Food packaging is essential to prevent food contamination by chemicals, physical damage, dust, temperature, light, humidity and microorganisms, which is an effective means of extending shelf life and reducing food loss and spoilage. The purpose of this article is to review recent advances in target metabolites for smart fruit and vegetable packaging.

Materials and Methods. The review includes foreign articles published in English from 2010 to 2022. Google Scholar, Scopus, Web of Science, ResearchGate were used for the search and further analysis. When selecting publications for review, priority was given to highly cited sources.

Results. Conventional packaging is designed to protect fruits and vegetables from the environmental impact. Intelligent packaging systems being a new field in food packaging are applied to real-time monitoring of products ranging from fruits and vegetables to meat and dairy products in the supply chain through the interaction between small components inside packaging (e.g. colorimetric indicator labels, sensors) and targeted transponders to provide suppliers and consumers with accurate information about product quality and the environment. Despite many benefits of such innovative food packaging, including increased efficiency in the use of products and food raw materials, reduced food safety concerns, and minimization of waste, there are many challenges to be overcome for the expansion and commercialization of smart fruit and vegetable packaging. First of all, the safety of smart packaging components must be considered, including the migration of chemical dyes in colorimetric indicator labels and chemical sensors, as well as the possibility of chemical interaction between smart packaging materials and food components. At present, the production of smart packaging for fruits and vegetables is predominantly concentrated in small laboratories without taking into account production costs. Industrial adoption has been problematic because the inclusion of smart meter components has made cost increases inevitable. Further deeper scientific research is needed to reduce the cost of smart packaging materials and processing.

Conclusion. Intelligent active packaging is designed and used to monitor fruit and vegetable quality, safety and environmental conditions in real time, both to quickly identify fruit and vegetable quality defects and to provide visual and up-to-date information. In future, active packaging can be incorporated into intelligent packaging systems to facilitate quality control while providing antibacterial, antioxidant and other protective properties. However, further research should be aimed at solving problems related to safety assessment, legal regulation, cost management and other factors in order to maximize use in industrial production.

KEYWORDS

packaging, smart packaging, indicator labels, films, sensors, biosensors, nanoparticles



To cite: Burak, L. Ch., Sapach, A. N., & Pisarik, M. I. (2023). Intelligent packaging for vegetables and fruits, classification and prospects for use. *Health, Food & Biotechnology*, 5(1), 51–80. <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i1.s165>

ВВЕДЕНИЕ

Согласно результатам исследования ФАО, во всем мире теряется или выбрасывается примерно треть продуктов питания, производимых для потребления человеком, что соответствует примерно 1,3 млрд тонн в год. Так, например в 2019 году в мире, по данным ФАО с момента сбора до розничной реализации¹ потери продуктов питания составили около 14 %. Фрукты и овощи являются важным компонентом пищи, богатыми витаминами, минералами, пищевыми волокнами, полифенолами и другими питательными веществами, играющими жизненно важную роль в обеспечении потребителей во всем мире свежими, питательными и полезными продуктами (Alegbeleye et al., 2022). Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) рекомендует каждому человеку потреблять не менее 400 г фруктов и овощей каждый день (FAO, 2021). Между тем, свежие фрукты и овощи подвержены порче, вызывая образование отходов и экономические потери. 2021 год был объявлен Генеральной Ассамблеей Организации Объединенных Наций Международным годом фруктов и овощей, в целях содействия здоровому и устойчивому производству фруктов и овощей с помощью инноваций и технологий, а также сведения к минимуму потерь и отходов (FAO, 2021). Подсчитано, что примерно 40–50 % фруктов и овощей ежегодно используется неэффективно (Jung et al., 2020), преимущественно из-за послеуборочного физиологического метаболизма (дыхания и транспирации), неправильных условий хранения (например, газовая среда, температура и влажность) и порчи, вызванной размножением микробов (Perumal et al., 2022). В частности, нарушение температурного режима, влажность и загазованность могут изменить физиологический метаболизм самих овощей и фруктов, что, в свою очередь, может ускорить порчу (Gao et al., 2020; Liang et al., 2022). Кроме того, физиологические процессы, которые происходят во время послеуборочного хранения, создают дополнительные возможности для заражения микробами (особенно грибами), что является еще одним ключевым элементом ухудшения качества плодоовощного сырья. Таким образом, разработка экономичных послеуборочных технологий для уменьшения порчи овощей и фруктов за счет воздействия на эти факторы представляет постоянный интерес для исследователей (Shu et al., 2020; Zhang 2019; Jiang et al., 2020, 2021).

Следует отметить, что соответствующая технология упаковки для овощей и фруктов не только сводит к минимуму микробиологические и химические опасности для сохранения свежести и продления срока хранения, но также позволяет эффективно контролировать процесс во время транспортировки, хранения и продажи,

обеспечивая удобство как для бизнеса, так и для потребителей, тем самым повышая качество плодоовощного сырья и сокращая количество отходов. Упаковка имеет важное значение для предотвращения загрязнения пищевых продуктов химическими веществами, механического повреждения, пылью, температурой, светом, влажностью и микробами, что является эффективным средством продления срока хранения и сокращения пищевых потерь и порчи. В результате технологических инноваций и изменения потребительских предпочтений упаковка фруктов и овощей претерпела изменения, от обычной упаковки с газовым регулированием к повсеместно распространенной интеллектуальной упаковке. Обычная упаковка предназначена для защиты фруктов и овощей от внешней среды, тогда как интеллектуальная упаковка раскрывает информацию о качестве фруктов и овощей, включая свежесть, спелость и микробиологическую обсемененность, с использованием индикаторных этикеток, датчиков и других технологий (de Oliveira Filho et al., 2021; Flórez et al., 2022). Соответственно, такая упаковка отслеживает изменения во внешней среде, включая изменения температуры, влажности и содержания углекислого газа, что, в свою очередь, снижает потери и отходы и повышает ценность использования (Fernandez et al., 2022).

Процессы исследования интеллектуальной упаковки для овощей и фруктов все еще находятся на ранней стадии, по сравнению с более изученными упаковками для мясных и рыбных продуктов. Исследование последних разработок в области интеллектуальной упаковки для отслеживания качества фруктов, включая датчики свежести и зрелости, было недавно опубликовано в научном обзоре (Alam et al., 2021). Потенциал интеллектуальной упаковки овощей и фруктов, включая качество пищевых продуктов, мониторинг безопасности и индикацию свежести, также проиллюстрирован в другом обзоре (Fernandez et al., 2022). Вместе с тем, по сравнению с другими пищевыми продуктами, фрукты и овощи более подвержены загрязнению, имеют ограниченный срок хранения и большие объемы отходов. Поэтому исследования по разработке интеллектуальных упаковочных систем для овощей и фруктов, в последнее время вызывают значительный интерес (Jafarzadeh et al., 2021; Jung et al., 2020). Всестороннего обзора целевых метаболитов, которые могут быть применены в интеллектуальной упаковке плодоовощного сырья, а также достижения в области классификации и практического применения интеллектуальных систем упаковки на момент написания данной статьи не установлено. Поэтому цель нашей статьи — провести обзор интеллектуальных методов упаковки фруктов и овощей, проанализировать последние достижения в области целевых метаболитов,

¹ FAO (2019). The State of Food and Agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction. Rome. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Retrieved from <https://www.fao.org/state-of-food-agriculture/2019/en/>. Accessed July 1, 2022.

которые будут использоваться для обнаружения в интеллектуальной упаковке. В статье дано краткое описание механизмов взаимодействия метаболитов с упаковочными материалами, представлена классификация интеллектуальных упаковочных систем для овощей и фруктов и их соответствующие практические применения.

Целевые метаболиты для интеллектуальной упаковки фруктов и овощей

Фрукты и овощи очень подвержены физиологическому разложению, микробной порче и механическим повреждениям, вызванным эндогенными ферментами и экзогенными микроорганизмами, а также кислородом, влагой и механическим воздействием при хранении, транспортировке и реализации. Следовательно, для разработки интеллектуальных систем упаковки, способных указывать на изменение качества необходимо определить основные метаболиты, указывающие на качество, также называемые целевыми метаболитами. Для фруктов и овощей основными метаболитами/соединениями, указывающими на качество, являются диоксид углерода, этилен, альдегиды, серосодержащие летучие вещества, летучие органические кислоты, этанол и хлорофилл. Один или несколько из этих метаболитов могут быть обнаружены индикаторными системами, включающими индикаторные метки и датчики, чтобы установить изменение качества (Ghaani et al., 2016).

При определении пороговых концентраций индикаторных соединений учитывают, что они отсутствуют или присутствуют в небольших количествах во фруктах и овощах, а их концентрация увеличивается при хранении, что напрямую связано с реальной свежестью и спелостью. В целом принято считать, что изменения свежести, зрелости, микробиологической безопасности в овощах и фруктах будут точно соответствовать повышению концентрации целевых метаболитов. Установлено, что при хранении фруктов и овощей происходит резкое изменение количества углекислого газа, альдегидов, серосодержащих соединений, этилена, летучих органических кислот, этанола и летучих газов. Поскольку эти соединения используются в качестве целевых метаболитов для «умной» упаковки и мониторинга изменений качества фруктов и овощей на них следует остановиться более подробно.

Углекислота

После сбора фруктов и овощей в организме продолжается дыхание, при этом выделяется значительное количество углекислого газа, преобладающего продукта микробного метаболизма. В то же время изменения

качества фруктов и овощей, возникающие в результате роста микроорганизмов, также сопровождаются образованием углекислого газа (Luo et al., 2022). Кроме того, в ходе хранения фруктов и овощей, которые были подвержены действию бактерий и в результате процесса дыхания, может происходить повышение уровня углекислого газа в составе свободного пространства над упаковкой. Поврежденная растительная ткань в упакованных пищевых продуктах, по-видимому, имеет повышенную частоту дыхания, что истощает кислород и вызывает накопление углекислого газа в свободном пространстве упаковки, изменяя pH окружающей среды и показывая, насколько свежими являются фрукты, овощи и другие продукты питания (Choi & Han, 2018). В большинстве научных исследований учитывалось использование чувствительных к pH химических веществ или натуральных красителей для отслеживания изменений pH и образования CO₂ в качестве показателей результатов того, как интенсивно у перца (Chen et al., 2018), драконьего фрукта (Warsiki & Rofifah, 2018), грибов (Liu, Wu et al., 2022) и дыни (Lu et al., 2018) происходит процесс дыхания. В ходе исследования использовали смесь 3: 2 обычных химических красителей метилового красного и бромтимолового синего в качестве меток-индикаторов для оценки сохранения качества свеженарезанного перца. В процессе эксперимента pH снизился с 7,1 до 4,4 с увеличением содержания CO₂, что привело к изменению цвета метки с желто-зеленого на оранжевый. Между тем, количество аэробных колоний, потеря веса, содержание хлорофилла, содержание малонового диальдегида, проницаемость мембран и органолептические показатели перца почти одновременно изменились с изменением качества, отражаемым индикаторными метками. Также, в другом исследовании использовалась индикаторная этикетка с красителем метиловым красным для отслеживания изменений содержания CO₂ в упаковках фруктов дракона (Warsiki & Rofifah, 2018). С изменением содержания CO₂ в упаковке, цвет этикетки менялся с желтого на красный, а изменение цвета становилось более выраженным по мере хранения драконьего фрукта, что показывало качество хранения.

Благодаря своим свойствам и простоте производства многие новые материалы, такие как гидрогели, также используются для интеллектуальной упаковки овощей и фруктов (Cao & Mezzenga, 2020; Liu, Zhang et al., 2022; Zhao et al., 2018). Недавно был разработан самонесущий целлюлозный гидрогель, чувствительный к CO₂, который можно использовать в качестве колориметрического индикатора порчи пищевых продуктов для интеллектуальной упаковки пищевых продуктов (Lu et al., 2018). Гидрогель считался подходящим материалом для датчика CO₂, поскольку он содержит большое количество воды и в ответ на CO₂, параметры окружающей среды быстро производит протонирование. Вышеуказанный гидрогель применяли для индикации свежести

свежесрезанной дыни, и по мере увеличения времени хранения было установлено заметное изменение цвета индикатора с темно-зеленого на оранжево-желтый, что свидетельствует о значительном образовании CO_2 , связанном с размножением микробов и соответствующую порчу пищевых продуктов. Кроме того, взаимодействия белок-полисахарид были использованы во многих исследованиях, и эти взаимодействия подробно охарактеризованы в исследованиях по разделению белков и разработке систем и сенсоров стимул-реакция (Joshi et al., 2018; Kayitmazer et al., 2013). Также был подготовлен CO_2 индикатор, основанный на реакции казеината натрия и пектина, чтобы наглядно показать его применение в качестве индикатора качества пищевых продуктов (Choi & Han, 2018).

При разработке интеллектуальной упаковки необходимо учитывать основную проблему, основанную на отслеживании изменений концентрации CO_2 . Было доказано, что идентификация микробного роста с помощью CO_2 может быть неправильно истолкована при использовании для сырья, упакованных в модифицированной среде, даже несмотря на то, что концентрация CO_2 увеличивается во время хранения, в первую очередь из-за высоких концентраций, CO_2 ($\geq 20\%$) уже присутствующих в пакетах MAP (Miller et al., 2021), что является основным ограничением для дальнейшего применения. Кроме того, для различных изменений качества фруктов и овощей достигаются разные пороговые значения CO_2 , что не обеспечивает однородности в использовании.

Летучие органические кислоты

Летучие органические кислоты представляют собой жирные кислоты с прямой цепью и низким содержанием углерода, такие как муравьиная кислота, уксусная кислота и масляная кислота, которые преобладают в различных фруктах и овощах. Вместе с дыханием ферментация производит метаболиты, включающие этанол, ацетальдегид и уксусную кислоту. Впоследствии в результате ферментативной реакции фермент этанолдегидрогеназа окисляет этанол до ацетальдегида, который затем окисляется до уксусной кислоты. Следовательно, изменения pH происходят в ответ на образование летучих органических кислот (например, уксусной кислоты). Было проведено исследование, в котором этот принцип использовался для изготовления индикаторных этикеток, указывающих на свежесть гуавы (Kuswandi et al., 2013). Новый индикатор цвета упаковки на основе бромфенолового синего был получен путем иммобилизации бромфенолового синего на мембране из бактериальной целлюлозы методом абсорбции (Kuswandi et al., 2013). Гуава является плодом длительного хранения, и во время хранения летучие органические соединения (например, уксусная кислота) постепенно накапливаются в свобод-

ном пространстве упаковки с течением времени, снижая pH окружающей среды верхушки, что, в свою очередь, вызывает изменение цвета плода, видимый невооруженным глазом, которые улавливает индикатор (от синего до зеленого). Соответственно, несколько параметров, часто используемых для характеристики свежести гуавы, в том числе содержание растворимых твердых веществ, текстура и органолептическая оценка, имеют тенденцию, сравнимую с показаниями индикатора. Следует отметить, что виноград, претерпевает изменения в составе летучих органических кислот (например, малеиновой и винной кислот) во время созревания, что может быть отражено на этикетках с индикаторами упаковки, произведенных на основе хлорфенолового красного (Kuswandi & Murdyaningsih, 2017). Заметное изменение цвета индикаторной этикетки стало возможным благодаря увеличению количества сахаров во время созревания винограда, неуклонному снижению содержания летучих органических кислот в свободном пространстве упаковки и одновременным изменениям pH. Результаты исследования показали, что цвет вышеупомянутой индикаторной этикетки имеет положительную линейную связь со зрелостью винограда, что может применяться в качестве индикаторной этикетки на упаковке для мониторинга сохранения винограда.

Альдегид

При дыхании фруктов и овощей во время созревания образуется множество органических соединений, включая альдегиды, сложные эфиры, спирты, кетоны и этилен. Эти соединения применялись для определения степени свежести, зрелости, качества и безопасности фруктов и овощей с использованием неразрушающих датчиков, включая электронный нос, флуоресцентные датчики (Betemps et al., 2012), колориметрические химические датчики (Lang & Hübert, 2012) многие другие. Было проведено исследование по разработке колориметрического индикатора для обнаружения глутарового альдегида в жидкой и газовой фазах. Нижнюю сторону покрыли двухсторонней пластиковой лентой, препятствующей утечке химического вещества, а верхняя сторона содержала чувствительный к pH реагент-краситель, который непосредственно взаимодействует с альдегидом, вызывая изменение цвета. В щелочной среде альдегиды вступают в реакцию нуклеофильного присоединения или диспропорционирования, в результате которой образуется карбоновая кислота или карбоксилат, вызывая изменение щелочности (Kim et al., 2018). Этот принцип можно использовать для создания цветных индикаторов, чувствительных к альдегидам, путем включения NaOH в красители, чувствительные к pH. Альдегидная колориметрическая сенсорная этикетка, основанная на реакции Канниццаро в сочетании с красителем метиловым красным и изготовленная с использованием

чернил для печати, использовалась для мониторинга в режиме реального времени в течение срока годности упакованных яблок (Kim et al., 2018). Результаты данного исследования также показали перспективы применения этикетки для контроля хранения яблок в сочетании с сенсорным тестированием и анализом параметров, включающих содержание растворимых сухих веществ и твердость.

Установлены некоторые научные публикации об изобретении колориметрических сенсоров, в которых амин-ПЭГ (полиэтиленгликоль) используется в качестве реагента для обнаружения альдегидов. Поли(этиленгликоль) бис(3-аминопропил) защищенный (амин-ПЭГ) представляет собой полимер амина с концевой аминогруппой, который может нуклеофильно реагировать на альдегидные группы, проявляя исключительные свойства адсорбции альдегидов. Shao et al. (2022) изготовили колориметрическую пленку для обнаружения выбросов альдегидов на основе этилцеллюлозы/поливинилового спирта в сочетании с полиэтиленгликолем, бис(3-аминопропил), закрытым (амин-ПЭГ) и метиловым красным, и применили ее для контроля свежести киви. Исследование показало, что колориметрический отклик на альдегид показал высокую чувствительность и эффективную влагостойкость. Тенденция изменения цвета колориметрической пленки была аналогична тенденции изменения параметров свежести киви, включая органолептические тесты, общее количество растворимых сухих веществ (СВ), твердость, потерю веса, титруемую кислотность, содержание аскорбиновой кислоты и малонового диальдегида (МДА). Полученные данные подтвердили заметный переход цвета на колориметрической пленке по мере созревания киви (от сине-фиолетового до темно-красного, а затем постепенно до красного).

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что, использование альдегидов для разработки интеллектуальных упаковочных систем для контроля свежести фруктов и овощей является перспективным, однако их влияние на качество и безопасность фруктов и овощей является ключевым вопросом, когда речь идет о практическом применении.

Этилен

Фитогормон этилен — газ, синтезируемый растениями, эндогенный регулятор роста растений. В сельском хозяйстве этилен можно считать индикатором степени зрелости для определения времени сбора урожая. Чтобы избежать порчи продукции, вызванной избытком этилена при хранении и транспортировке фруктов и овощей содержание этилена, можно регулировать. В настоящее время традиционные количественные измерения этилена состоят из хроматографического (Qi et al., 2020),

спектроскопического (Pathak et al., 2017) и электрохимического анализов, которые являются сложными и трудоемкими. Учитывая ограниченные химические свойства этилена, было разработано лишь небольшое количество датчиков, основанных на металлах и оксидах металлов. Изготовили чувствительную пленку, нанеся SiO_2 наночастицы на фильтровальной бумаге и индикаторный раствор, синтезированный из сульфата палладия и молибдата аммония. Цвет индикаторной пленки менялся от белого до синего при окислении этилена. В другом исследовании был разработан датчик, основанный на реакции между поли(диацетиленом) и реагентом Лоусона. Цвет датчика меняется с синего на красный, что было видно невооруженным глазом после воздействия этилена. Датчик имеет предел обнаружения 600 ppm для этилена и может применяться для отслеживания этилена, выделяемого во время созревания фруктов (Nguyen et al., 2020).

Несмотря на эти достижения, включение ионов металлов в эти виниловые датчики и их применение в пищевой упаковке весьма ограничено. В последние годы природные полимеры были всесторонне изучены для изготовления разлагаемых пленок для упаковки пищевых продуктов с учетом их безопасности, доступности и биосовместимости (da Silva Filipini et al., 2020; Ma & Wang, 2016). Авторы Pirsá and Chavoshizadeh (2018) изобрели новый датчик газа этилена на основе переносимых пленок из нановолокон из бактериальной целлюлозы, легированных KMnO_4 , который можно использовать в упаковке для бананов, с целью измерения температуры и уровня этилена во время хранения. Кроме того, киви, манго и груши входят в число фруктов, для упаковки которых уже широко используется технология маркировки Ripe Sense. Этот индикатор использует количество этилена для измерения степени созревания плодов. Цвет этикетки меняется с красного на желтый по мере созревания плода, что позволяет потребителю узнать, когда фрукт готов к употреблению.

Серосодержащие соединения

Небольшое количество летучих веществ, таких как сульфиды, претерпевает значительные изменения в течение периода созревания и хранения плодов, поэтому они могут также рассматриваться в качестве средств реагирования в интеллектуальной упаковке. Было установлено, что серосодержащие соединения, которые составляют большинство ароматических соединений фрукта дуриан, постоянно изменяются во время послеуборочного хранения и связаны с физико-химическими свойствами плодов (Niponsak et al., 2015). Спелый дуриан дает чрезвычайно низкую концентрацию летучих веществ, тогда как у перезрелого высокие уровни летучих веществ. Учитывая, что сульфиды могут вызывать колебания pH,

можно использовать индикатор pH на основе красителя, чтобы отслеживать их выделение и соответственно показывать зрелость плодов.

Колориметрическая пленка для мониторинга летучих веществ дуриана в режиме реального времени была изготовлена методом литья с включением природных полимеров (хитозан, карбоксиметилцеллюлоза и др.) и химических красителей pH (метиловый красный и бромтимоловый синий в качестве индикаторов) для определения их зрелости (Niponsak et al., 2016). В сочетании с ГХ-МС идентификацией летучих соединений в свободном пространстве свежесрезанного дуриана было обнаружено, что серосодержащие летучие вещества (диэтилдисульфид, диэтилтрисульфид, 3,5-диметил-1,2,4-трисилан и его изомеры 1 и 2) могут быть индикаторами степени созревания (Niponsak et al., 2015). Интересен факт, что изменение соединений серы в процессе созревания дуриана показала полное соответствие с изменением цвета индикаторных пленок (от красного к оранжевому и, наконец, к желтому). Впоследствии группа исследователей подготовила новый индикатор созревания для дуриана с комбинацией крахмала, хитозана и метилового красного, смешанного с бромтимоловым синим в качестве индикатора. По сравнению с предыдущими исследованиями в этой работе было проведено дополнительное исследование срока хранения вышеупомянутой этикетки индикатора зрелости и изучена возможность использования этого индикатора для мониторинга зрелости в различных условиях хранения (Niponsak et al., 2020). Однако возможность использования сульфидов в качестве мишени для мониторинга спелости фруктов и овощей изучалась только на дуриане, что, предположительно, связано с его особым вкусом. Вопрос о том, может ли сульфид быть респондентом для отслеживания изменений качества других фруктов и овощей с характерным вкусом, представляет интерес для дальнейшего изучения.

Другие показатели

В дополнение к упомянутым выше метаболитам ряд других соединений, которые коррелируют со свежестью и зрелостью фруктов и овощей, могут служить целевым респондентом для интеллектуальной упаковки и мониторинга фруктов и овощей. В результате микробной ферментации во фруктах и овощах образуется этанол, который при избыточном содержании может повлиять на вкус продуктов (особенно ферментированных продуктов из фруктов и овощей) и оказать негативное влияние на их пищевую ценность. В связи с этим был разработан и изготовлен колориметрический индикаторный куб для интеллектуальной упаковки с целью обнаружения этанола в сушеных плодах манго (Kaewnu et al., 2022). Индикатор состоит из пористой меламиновой

пены, содержащей индикаторный раствор дихромата калия и серной кислоты, который показывает заметное изменение цвета от желтого до коричневого, зеленого и синего в диапазоне концентраций этанола от 0,25 % до 5,0 %. Метод позволяет оперативно отслеживать изменения качества и безопасности пищевых продуктов, контролируя наличие этанола в интеллектуальных упаковках, содержащих подготовленные колориметрические индикаторные кубики. Кроме того, концентрация хлорофилла является чувствительным индикатором созревания и старения фруктов и заметно снижается в процессе созревания фруктов и овощей (Betemps et al., 2012).

Комбинированные показатели

Многие исследования посвящены изучению несколько метаболитов в качестве чувствительных интеллектуальных упаковочных систем, чтобы более точно и тщательно проанализировать потенциал интеллектуальной упаковки для фруктов и овощей в информировании об изменениях качества, связанных со свежестью и зрелостью. Отмечено, что эти метаболиты действуют вместе в качестве индикации и обычно оказывают интеллектуальное ответное воздействие при изменении pH. Например, в ходе исследования были разработаны коврики из нановолокон электропрядения для биосенсоров pH, сочетающие экстракты красной капусты (натуральные красители) с поливиниловым спиртом (Maftoonazad & Ramaswamy, 2019). Из-за механических повреждений свежие плоды фиников имеют повышенную скорость дыхания, что вызывает значительное образование метаболитов брожения, состоящих из этанола, органических кислот, кетонов, ароматических соединений и ацетальдегида. Вместе эти метаболиты вызывают изменение pH среды внутри упаковки. Кроме этого были созданы интеллектуальные индикаторные метки для обнаружения изменений pH во время созревания бананов и отслеживания его ухудшения с использованием бразильского экстракта в качестве возможного природного хромогенного агента pH (Ardiyansyah et al., 2020). В некоторых исследованиях колебания pH окружающей среды при упаковке фруктов и овощей были вызваны CO₂. Органические кислоты также использовались для оценки свежести других фруктов, таких как манго (Dirpan et al., 2018) и личи (Zhou et al., 2021).

Механизм химической реакции целевых метаболитов и упаковочных материалов

Физиологическая активность фруктов и овощей производит целевые метаболиты, поэтому интеллектуальная упаковка может реагировать на взаимодействие между метаболитами и упаковочными материалами. Для более

эффективного научного использования метаболитов, необходимо разработать механизм взаимодействия между метаболитами и упаковочными материалами. Химические взаимодействия вышеперечисленных метаболитов с красителями (частью упаковочного материала) можно разделить на три типа: структурные изменения pH-чувствительных красителей, химические реакции летучих альдегидов и окислительно-восстановительные реакции ионов металлов.

Структурные изменения pH-чувствительных красителей

Кислотно-щелочные условия среды упаковки могут быть изменены несколькими метаболитами, выделяемыми фруктами и овощами, такими как CO_2 , органические кислоты и сульфиды. Некоторые pH-чувствительные красители претерпевают изменения структурной формы в ответ на такие кислотно-щелочные процессы, изменяя цвет. Обычно используемые индикаторы pH в упаковочных материалах для фруктов и овощей содержат химические красители, такие как метиловый красный, бромкрезоловый фиолетовый и хлорфеноловый красный, а также красители природного происхождения, включая антоцианы, пигменты свеклы и куркумин. Метиловый красный является азокрасителем и содержит двойную связь азот-азот (Luo et al., 2022). Благодаря своему красному цвету в кислой среде и желтому цвету в щелочной он часто применяется в качестве хромогенного компонента интеллектуальной упаковки. Кроме того, антоцианы играют важнейшую роль в колориметрическом отклике интеллектуальной упаковки в качестве натуральных красителей, которые легкодоступны. Антоцианы преимущественно присутствуют в кислых средах в виде флавоноидных катионов (красноватого цвета). По мере увеличения pH происходит депротонирование гидроксильной группы, и катион флавоноида становится метанольным псевдооснованием и в конечном итоге ведет себя как синее анионное хиноновое основание в щелочной среде (Qin et al., 2019). Изменение цвета от красного (pH 2,0) до розового (pH 3,0–6,0), бледно-лилового (pH 7,0), сине-фиолетового (pH 8,0–10,0) и, наконец, желто-зеленого (pH 11,0–12,0) отражает окраску антоцианов при различных условиях pH (Guo, Xue et al., 2022; Liu, Wu et al., 2022).

Химические реакции летучих альдегидов

Альдегиды проходят процессы нуклеофильного присоединения, с образованием карбоновых кислот или карбоксилатов, что приводит к изменению кислотности и щелочности в щелочной среде (избыток гидроксид-ионов) (Kim et al., 2017). Альдегиды, которые включают водород в α -положении, обычно имеют

более высокую склонность к реакциям, называемым реакциями гидроксильдольной конденсации. С другой стороны, альдегиды без α -водорода, такие как бензальдегид, проявляют реакции, часто известные как реакции Канниццаро. Включение щелочных веществ и чувствительных к pH красителей (таких как метиловый красный и бромкрезоловый фиолетовый) в упаковочные материалы для фруктов и овощей может способствовать эффективному реагированию на летучие альдегиды. Например, цвет метилового красного меняется с желтого на красный при переходе из щелочного состояния в кислое. В результате собственной альдольной конденсации образуются олигомеры глутарового альдегида. Реакция протекает до тех пор, пока pH продукта реакции не изменится до нейтрального, после чего образуется азокомплекс. Азокомплексное соединение, содержащее делокализованный положительный заряд, меняет цвет индикатора с желтого на красный. На таких концепциях основан мониторинг альдегидов, выделяемых при созревании таких фруктов, как киви (Shao et al., 2022) и яблок (Kim et al., 2018).

Окислительно-восстановительная реакция ионов металлов

Хорошо известно, что многие ионы металлов в окисленном и восстановленном состояниях имеют различную окраску. Таким образом, включение солей металлов, способных вступать в окислительно-восстановительные реакции с целевыми аналитами, в упаковку фруктов и овощей (фрукты, не находящиеся в прямом контакте с мякотью) вызвало большой интерес у исследователей (Hu, Li et al., 2016; Iskandar et al., 2020). В частности, используя это свойство в сочетании с восстановительной природой этилена, было разработано множество интеллектуальных индикаторов/датчиков с добавлением ионов металлов для отслеживания изменений этилена во время созревания фруктов и овощей. Как отмечалось в разделе 2.4, этилен использовался для восстановления Mo(VI) до Mo(V) для изменения цвета с белого на синий (Iskandar et al., 2020; Lang & Hübner, 2012). Точно так же, в присутствии этилена ионы перманганата могут вызывать изменение цвета (Pirsa & Chavoshizadeh, 2018).

Классификация интеллектуальных систем упаковки фруктов и овощей

Фрукты и овощи признаны незаменимыми компонентами сбалансированной диеты, которая защищает от множества заболеваний, включая ожирение, диабет II типа и болезни сердца (Chen, Pu et al., 2022). Однако, поскольку плодоовощное сырье более подвержено порче и имеет ограниченный срок хранения, усилия ученых направле-

ны на создание интеллектуальных упаковочных систем, которые могут отслеживать изменения качества фруктов и овощей в режиме реального времени, включая колориметрические индикаторные этикетки, био/химические датчики, метки радиочастотной идентификации (RFID) и так далее. Как правило, эти интеллектуальные упаковочные системы прикрепляются в качестве этикеток к внутренней части или свободному пространству упаковки пищевых продуктов для определения качества пищевого продукта (Yong & Liu, 2020). Интеллектуальная

упаковка не только показывает различия в качестве в отношении свежести/зрелости пищи в зависимости от взаимодействия между продуктом и окружающей средой упаковки во время хранения, транспортировки и продажи (Shao et al., 2021), но также отслеживает историю продукта, от поставки сырья до производства продукции, упаковки продукции, логистики и дистрибуции, продаж и т. д. Перечень различных интеллектуальных упаковочных систем, применимых в настоящее время к фруктам и овощам, представлен в Таблице 1.

Таблица 1

Индикаторные этикетки, датчики, время-температурные индикаторы, RFID в интеллектуальных системах упаковки фруктов и овощей

Категория	Фрукты/овощи	Интеллектуальный ответ	Основные результаты	Действие	Источник
Индикаторные этикетки из гидрогелевой пленки	Банан	Гидрогели реагируют на изменения влажности Адсорбция этилена KMnO_4	гидрогелевая пленка CMC/NFC/KMnO_4 ; модифицированный NFC и KMnO_4 (улучшенные механические свойства, термические свойства, чувствительность к этилену) и используемый в качестве поглотителя влаги/этилена в упаковке бананов при 0 и 25°C в течение 30 дней.	Интеллектуальный отклик и регулировка влажности в упаковке. Задержка созревания фруктов (срок хранения) в дополнение к контролю микробной порчи и окисления продуктов питания.	(Pirsa, et al 2021)
Этикетки с индикаторной пленкой	Манго, банан	Хитозановые пленочные носители для медленного высвобождения этилена	Спектроскопия времени жизни позитронной аннигиляции, атомно-силовая микроскопия и рамановская спектроскопия для исследования взаимосвязи между свойствами медленного высвобождения и микроструктурой пленок ETH/CS . Микроструктурные изменения в полостях оказывают существенное влияние на медленное выделение этилена.	Неразрушающий контроль и замедление выделения этилена. Высвобождение этилена из композитных пленок может обеспечить созревание манго и бананов в определенном диапазоне и контролировать созревание фруктов по требованию.	(Yao, et al 2022)
Индикаторные этикетки из гидрогелевой пленки	Свежесрезанная дыня	Реакция гидрогеля на изменения CO_2 Реакция красителя pH на изменение pH, вызванное CO_2	Гидрогелевые пленки меняют цвет с темно-зеленого на оранжевый, что свидетельствует о порче пищевых продуктов. Гидрогель богат водой и обеспечивает быстрое производство протонов в ответ на внешнюю стимуляцию CO_2 .	Гидрогелевые индикаторы для мониторинга свежести фруктов в режиме реального времени в умной упаковке.	(Lu et al., 2018)
Этикетки-индикаторы химических красителей	Кимчи (ферментированные овощи)	Красители pH реагируют на изменения pH, вызванные CO_2 , органическими кислотами (уксусная кислота, молочная кислота)	Изменение цвета индикаторной этикетки указывает на разные этапы брожения: синий — на начальный этап брожения, желтый — на оптимальную стадию брожения и красный — на конец брожения. Результаты миграционного теста подтверждают, что индикатор свежести не мигрирует в продукты, хранящиеся в контейнере.	Свежесть кимчи можно контролировать в режиме реального времени по концентрации CO_2 и уксусной кислоты в верхней части упаковки кимчи, не влияя на качество пищи.	(Baek et al . 2021)

Продолжение Таблицы 1

Категория	Фрукты/овощи	Интеллектуальный ответ	Основные результаты	Действие	Источник
Коаксиальные индикаторные этикетки, напечатанные на 3D-принтере	Личи	Натуральные пигменты реагируют на сдвиги pH, вызванные изменением массы.	Этикетки, обогащенные CS, CNF, 1-MCP и антоцианами черники, были изготовлены с использованием коаксиальной 3D-печати и ионного сшивания. Контролируемое высвобождение было достигнуто за счет захвата 1-MCP за счет электростатического эффекта ядра хитозана и оболочки CNF для устойчивого сохранения свежести. Парофазная газовая хроматография-ионная капельная спектрометрия Проверка точности индикаторной этикетки для отслеживания изменений свежести.	Интеллектуальные упаковочные этикетки с двойной функцией сохранения фруктов и контроля качества.	(Zhou et al., 2021)
Биосенсоры	Свежие финики	Натуральные пигменты реагируют на изменения pH из-за изменения свежести.	RCE, легированный в ПВС, для приготовления электростатически формованных матов из нановолокна, показывающих значения pH в диапазоне 2–12. Биосенсор pH PVA / RCE демонстрирует стабильность и обратимость.	Мониторинг в режиме реального времени связанных с pH (органические кислоты, CO ₂) массовых изменений в упаковке фруктов (свежесть). Может использоваться в качестве биоиндикатора, помещаемого в упаковку фруктов, или в качестве упаковочной пленки, контактирующей с фруктами.	(Maf-toonazad & Ramaswamy, 2019)
Биосенсоры	Нью-Мексико	Ответ ацетилхолинэстеразы	Формируется послойной сборкой электродов, ЗНЧ и модифицированной нафтоном нанопористой псевдоуглеродной пасты. Он проявляет высокое сродство к субстратам АХЭ и имеет линейный диапазон от $1,0 \times 10^{-8}$ до $1,0 \times 10^{-14}$ г/мл для паратона с пределом обнаружения $5,0 \times 10^{-15}$ г/мл.	Мониторинг фосфорорганических и метилпара-тионных пестицидов во фруктах и овощах.	(Deng et al., 2016)
Биосенсоры	Личи, апельсин (сок)	Сигнал сенсора ответа поверхностного антигена OmpD	Разработка чувствительной биосенсорной платформы в формате спектроскопии электрохимического импеданса с использованием G-GO на основе нового антигена OmpD (биомаркера). Изменения импедансного отклика датчика, отражающего концентрацию серотипа <i>Salmonella typhimurium</i> . Пределы обнаружения <i>Salmonella typhimurium</i> в образцах сока с шипами (личи и апельсина) составили $1,04 \times 10^1$ и $1,07 \times 10^1$ КОЕ/мл соответственно.	Его можно использовать для обнаружения <i>Salmonella typhimurium</i> во фруктах и овощах и продуктах из них.	(Mutreja et al., 2016)
Биосенсоры	Нью-Мексико	Хитозан-аптамер с нанощеткой	Комбинация бионических мягких материалов и целей обнаружения для селективного захвата небольшого количества бактерий из сложных матриц. Экспресс-тест (17 мин), селективное обнаружение <i>Listeria monocytogenes</i> в диапазоне концентраций $9-10^7$ КОЕ/мл.	Доступен в сочетании с упаковкой для фруктов и овощей для обнаружения <i>Listeria monocytogenes</i> в свежих фруктах и овощах.	(Hills et al., 2018)

Продолжение Таблицы 1

Категория	Фрукты/овощи	Интеллектуальный ответ	Основные результаты	Действие	Источник
Химические датчики (Газ)	Клубника, яблоко	Датчики передают данные о концентрации газа в терминальные программы	Датчик газа RMS88 (O_2 : 0–25 %; CO_2 : 0–0,5 % и 0–5 %) в сочетании с модульным респирометром для мониторинга в режиме реального времени концентрации газа и частоты дыхания в среде хранения. RMS88 непрерывно регистрирует концентрацию газа с фиксированными интервалами в 1 мин (клубника) и 5 мин (яблоки) и передает их в режиме реального времени в программу терминала для расчета частоты дыхания.	Для мониторинга на месте в режиме реального времени скорости дыхания во время хранения свежих продуктов и, следовательно, регулировки газовой атмосферы в хранилище в соответствии с частотой дыхания.	(Keshri et al., 2020)
Химические датчики (химическая реакция)	Киви	Изменение цвета в ответ на образование этилена, содержание	Функциональный сенсор на этилен, полученный реакцией полидиацетилена с реактивом Лоусона (концевые тиоловые группы декорируют полидиацетилен). Цвет сенсора меняется с синего на красный при воздействии этилена.	Возможен контроль выделения этилена при созревании плодов, что свидетельствует о спелости.	(Nguyen et al., 2020)
Влагочувствительные пленки	Клубника, черника, слива	Передача сигнала отклика на влажность на мобильные телефоны	Многофункциональная композитная бумага на основе металлоорганической основы и карбоксиметила на основе серебра (Ag-MOFs @ CMFP), полученная путем синтеза in situ. Моделирование реального хранения и транспортировки упакованных в ящики фруктов с использованием шейкера. Ag-MOF адсорбировали молекулы воды из упаковки и изменяли электрическое сопротивление пленки. Пленка обладает такими свойствами, как стойкость к трению, ударопрочность и низкая токсичность.	Мониторинг влажности среды фруктовой упаковки и сочетание его с антибактериальной консервацией. Адсорбция молекул воды из упаковочной среды для интеллектуального реагирования на влажность и удаленного мониторинга посредством передачи сигнала на мобильные телефоны.	(Zhang, Li et al., 2022)
Индикатор (время — температура) ТТІ (на основе диффузии)	Киви, клубника, манго	Изменение цвета в зависимости от влияния температуры окружающей среды на качество плодов	ТТІ на основе диффузии, состоящий из индикаторного слоя и функционального слоя, при этом изменение цвета среднего индикаторного слоя (от белого к синему) отражает влияние температуры окружающей среды и, кроме того, отражает качество фруктов. Изменение цвета этого ТТІ позволяет прогнозировать потерю веса, содержание растворимых сухих веществ, содержание витамина С, титруемую кислотность и антиоксидантную способность трех фруктов с ошибкой менее 15 %. E_a Различия между цветовой реакцией ТТІ и изменениями качества плодов были менее 25 кДж/моль, и их можно было использовать для мониторинга качества этих фруктов.	Схема быстрого контроля качества фруктов во время упаковки, хранения и распределения на основе визуального изменения цвета. Комбинация моделей диффузионного ТТІ и прогнозирования качества фруктов для создания кодов быстрого реагирования ТТІ для получения статуса качества фруктов путем сканирования.	(Yang & Xu, 2022)

Продолжение Таблицы 1

Категория	Фрукты/овощи	Интеллектуальный ответ	Основные результаты	Действие	Источник
ТТІ (на микробной основе)	Ананас, гранат, ананасовый мед	Изменение цвета в ответ на изменения времени и температуры при микробной порче фруктов	ТТІ для мониторинга микробного качества фруктов был разработан на основе изменения интенсивности цвета со временем и температурой (бесцветный-коричневый) из-за неферментативной реакции окислительного потемнения фенола. Цветовые сдвиги в ТТІ были аналогичны энергии активации (E_a) плода и хорошо коррелировали с микробным ростом в трех плодах ($R^2 \geq 0,7$).	Мониторинг микробной порчи минимально обработанных фруктов в зависимости от времени и температуры. Разработка ТТІ, которая может быть прикреплена к упаковке пищевых продуктов для обеспечения неразрушающего бесконтактного указания на изменение качества фруктов.	(Adiani et al., 2021)
Ферментативный ТТІ	Замороженная стручковая фасоль, белые грибы	Предсказания модели	Кинетическое моделирование параметров качества (цвет, содержание витамина С, содержание воды) замороженной стручковой фасоли в диапазоне от -3 до -20°C . Последующее моделирование влияния температуры на параметры качества с помощью уравнений Аррениуса и проверка в динамических температурных условиях.	Мониторинг изменения качества замороженной зеленой фасоли и замороженных грибов, в основном с точки зрения остаточного срока годности при различных температурах воздействия от производства до потребления.	(Ginnakourou & Taoukis, 2021)
RFID	Овощи	RFID-считыватель	Предлагается система на основе RFID для управления свежестью и мониторинга концентраций O_2 и CO_2 . Метки RFID объединяют данные о концентрации O_2 и CO_2 , связанные с дыханием свежих продуктов и их порчей.	Контроль свежести овощей. Синтез RFID-меток с датчиками свежести расширяет функциональные возможности RFID-технологии в качестве умной упаковки для фруктов и овощей.	(Eom et al., 2012)
RFID	яблоки	RFID-считыватель	Миниатюрный считыватель RFID в сочетании с датчиком газа на основе оксида металла и полупроводника (МОХ). Регулируя рабочую температуру газового датчика, можно количественно определять газы, связанные с определением качества яблок при хранении и транспортировке.	Его можно прикрепить к упаковке, чтобы отслеживать изменения свежести фруктов во время транспортировки и распределения.	(Vergara et al., 2017)
RFID	Фрукты и овощи	Обратная связь данных между RFID и WSN	Контроль температуры и влажности в холодильнике для хранения фруктов с помощью RFID и сети беспроводных датчиков WSN. Одновременно установлено 90 пассивных RFID-логгеров температуры с 7 микрочастицами в каждой камере. Трехмерные карты температуры, модели данных влажности от ASABE, расчет изменений энтальпии и абсолютного содержания влаги в воздухе.	Мониторинг логистики холодной цепи фруктов и овощей, улучшение холодильного хранения скоропортящихся продуктов; Оценка энергопотребления при хранении в холодильнике, потери влаги продуктами и обнаружение конденсации воды на хранимых товарах.	(Badia-Melis et al., 2015)

Окончание Таблицы 1

Категория	Фрукты/овощи	Интеллекту- альный ответ	Основные результаты	Действие	Источник
RFID	Фрукты и овощи	Обратная связь данных от системы отслеживания на основе датчиков RFID и Интернета вещей (IoT)	Система была протестирована в цепочке поставок скоропортящихся продуктов (кимчи) и предоставляет информацию о продукте в режиме реального времени, а также полную историю температуры и влажности для удобства менеджеров и клиентов. Интеграция моделей машинного обучения в ворота RFID позволяет правильно идентифицировать помеченные продукты, входящие и выходящие через ворота, повышая эффективность системы отслеживания.	В цепочке поставок фруктов и овощей отслеживание скоропортящихся продуктов (RFID) и измерение температуры и влажности при хранении и транспортировке (IoT). Отслеживаемость продукта.	(Badia-Melis et al., 2015)

Сокращения: ТТИ — индикатор время—температура; АХЭ — ацетилхолинэстераза; КМЦ — карбоксиметилцеллюлоза; ЦНВ — целлюлозные нановолокна; композитная пленка E/CS, винилхлорид/хитозан (ETH/CS); G-GO, графен-оксид графена; ЗНЧ — наночастицы золота; KMnO₄ — перманганат калия; NFC —наноцеллюлоза; н.у. — не указано; ПВА — поливиниловый спирт; RCE — экстракт красной капусты.

Колориметрические индикаторные
этикетки/пленки

Индикаторные этикетки, состоящие из макромолекулярных полимеров (обычно полисахаридов или белков) в сочетании с химическими или природными красителями, являются наиболее распространенной формой интеллектуальной упаковки при определении качества продукции из фруктов и овощей. Хромогенные красители являются неотъемлемым компонентом индикаторных этикеток, обычно представляющих собой индикатор на свежесть, спелость и другие показатели качества посредством изменения цвета, что соответствует области их применения и чувствительности. Краситель и целевые метаболиты, свидетельствующие об изменении качества плодоовощной продукции, химически взаимодействуют, вызывая вариации цвета индикаторных меток (Mohammadian et al., 2020). Как было отмечено ранее, в зависимости от особенностей мишени различные индикаторы могут иметь несколько признаков и содержать множество красителей.

Этикетки-индикаторы химических
красителей

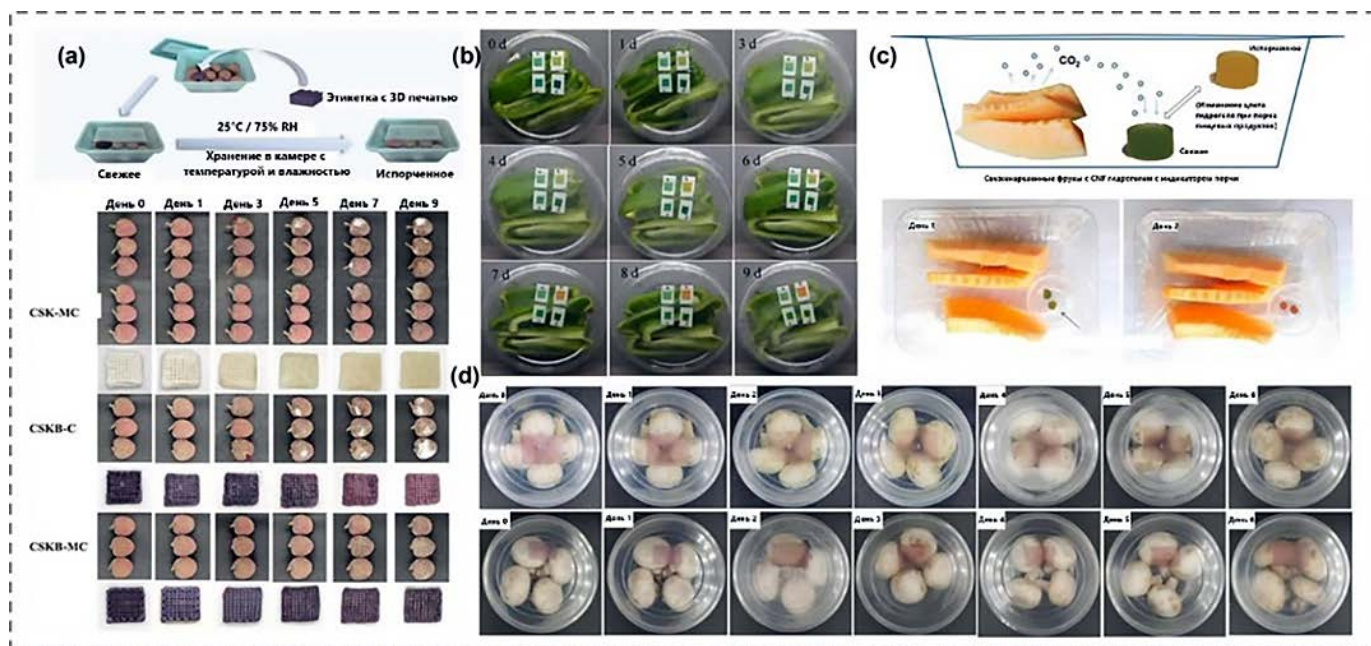
Химические хромогенные красители приобрели известность недавно, благодаря своей исключительной способности быстро реагировать, генерировать видимые цвета и сохранять эффективную стабильность (Shao et al., 2021). Химические хромогенные красители, такие как метиловый красный, феноловый красный, бромфеноловый красный, бромфеноловый синий и бромкрезоло-

вый фиолетовый, часто используются в пищевой промышленности, особенно в интеллектуальной упаковке для фруктов и овощей (Luo et al., 2022; Shao et al., 2022; Warsiki & Rofifah, 2018).

Пленочная этикетка была изготовлена с использованием смеси муки тапиоки, агара и красителя метилового красного для выявления различий в свежести драконьего фрукта и прикреплена на внутренней поверхности контейнера (Warsiki & Rofifah, 2018). Установлено, что при хранении драконьего фрукта в среде CO₂ органические кислоты конденсируются в упаковке, вызывая заметное изменение цвета этикетки метилового красного (желто-оранжево-красный). Эта модификация в конечном итоге показывает качество драконьего фрукта. Кроме того, фталоцианиновые красители, состоящие из фенолфталеина, фенолового красного, хлорфенолового красного и бромкрезолового фиолетового, широко используются в качестве индикаторов pH, в первую очередь из-за отчетливого изменения цвета, которое происходит при протонировании или депротонировании фенольных гидроксильных групп (Luo et al., 2022). Во время хранения гуавы летучие органические соединения, образующиеся в свободном пространстве упаковки, постепенно изменяют pH, а индикаторная этикетка меняет цвет (с синего на зеленый) (Kuswandi et al., 2013). Показано, что эта метка подходит для оценки качества гуавы в режиме реального времени в условиях окружающей среды (28–30°C). Аналогичные метки индикаторов также использовались для оценки качества хранения манго в режиме реального времени (Dirpan et al., 2018) и винограда (Kuswandi & Murdyaningsih, 2017).

Рисунок 1.

Интеллектуальные индикаторные этикетки/пленки, отражающие изменения качества фруктов и овощей.



(a) 3D-печатные этикетки из nanoцеллюлозы для сохранения фруктов и мониторинга свежести личи в режиме реального времени (Zhou et al., 2021). (b) Изменение цвета индикаторных этикеток для четырех составов свеженарезанных перцев, проверенных на порчу при $7 \pm 1^\circ\text{C}$. Среди них изменение цвета индикаторной этикетки, изготовленной из смеси метилового красного и бромтимолового синего (соотношение 3:2) (препарат MB2), было похоже на тенденцию изменения качества перца, что позволяло отслеживать порчу перца в режиме реального времени (Chen et al., 2018). (c) Индикатор на основе гидрогеля CNF для свежесрезанной дыни, указывающий на изменение свежести, с четким изменением цвета с темно-зеленого на оранжевый, указывающим на снижение свежести и также на порчу (Lu et al., 2018). (d) Интеллектуальные пленки для мониторинга свежести грибов были приготовлены путем включения нанокомплексов овальбумин-карбоксиметилцеллюлоза, насыщенных антоцианами, в матрицу кукурузного крахмала/поливинилового спирта с изменением цвета, указывающим на свежесть грибов при 20°C и относительной влажности 65 %: фиолетовый (0–1 день), красно-коричневый (2–3 дня), розовый (>4 дня) (Liu, Wu et al., 2022)

Несмотря на то, что индикаторные этикетки с одним красителем, используемые в вышеуказанных исследованиях, были эффективными для индикации качества свежих фруктов, они имели узкий диапазон цветовых переходов и неопределенность в различениях начального и конечного состояний, что препятствовало их дальнейшему применению. В связи с этой проблемой многочисленные исследования направлены на изучение индикаторных этикеток с несколькими красителями (или смешанными красителями) для повышения цветовой чувствительности конечной точки, вызванной ухудшением качества фруктов и овощей, а также более эффективным обнаружением порогов ухудшения качества. Комбинируя различные цветовые красители, смешанные индикаторы обычно используются для расширения области изменения цвета и повышения четкости процесса модификации цвета (Chen et al., 2018; Liu, Ma et al., 2021; Niponsak et al., 2016). Так, например, для проведения мониторинга процесса созревания киви использовали изготовленную колориметрическую пленку

на основе хитозана. В качестве индикатора в состав пленки были включены метиловый красный и бромкрезоловый фиолетовый. Видимый переход цвета (от сине-фиолетового к темно-красному, а затем постепенно к красному) взаимосвязан с качеством зрелости плодов. Примечательно, что колориметрический ингредиент этой этикетки термоставивается между двумя гидрофобными листами, защищая индикатор от дыхания и транспирации фруктов и обеспечивая более стабильный цвет. Следует также отметить применение изготовленной индикаторной этикетки со смесью растворов метилового красного и бромтимолового синего (соотношение 3:2) для контроля свежести свеженарезанного перца. Метка смешанного красителя значительно расширила диапазон цветовых сдвигов, что позволило эффективно отслеживать изменения CO_2 в диапазоне 0–5 % (об./об.) (Chen et al., 2018).

Этикетки-индикаторы с использованием натуральных красителей

Несмотря на преимущества этикеток с химическими красителями (чувствительные изменения цвета), необходимо учитывать возможную токсичность их миграции в пищевые матрицы. Следовательно, безопасность использования этих непищевых красителей в индикаторных этикетках будет препятствием для промышленного использования. Учитывая это, индикаторные этикетки, содержащие проявители натуральных красителей, все чаще становятся в приоритете исследований для умной упаковки фруктов и овощей с точки зрения их доступности и безопасности (Balbinot-Alfaro et al., 2019). В настоящее время натуральные красители, которые используются в колориметрической смарт-упаковке, включают антоцианы, куркумин и пигменты свеклы (Almasi et al., 2022). Наибольшее внимание для широкого изучения и использования представляют антоцианы (Etxabide et al., 2021). Они обладают широким диапазоном свойств (разнообразие цветов, различная чувствительность, широкий диапазон pH, множество источников и т. д.), которые облегчают изготовление этикеток, что делает их пригодными для умной упаковки в качестве натуральных красителей (Becerril et al., 2021; Luo et al., 2022; Yong & Liu, 2020). Недавно в ходе исследования была успешно изготовлена высокочувствительная к pH этикетка двойного назначения для сохранения и мониторинга фруктов, содержащая антоцианы черники, с использованием коаксиальной 3D-печати и ионного сшивания, а ее функциональность подтверждена при упаковке личи (Zhou et al., 2021). Тем не менее структура антоцианов крайне нестабильна, и применительно к интеллектуальным меткам требуются дополнительные меры для повышения ее стабильности (Almasi et al., 2022). Авторы Liu, Wu et al. (2022) улучшили стабильность антоцианов, загрузив их в наноконкомплекс овальбумин-карбоксиметилцеллюлозу, который впоследствии был включен в матрицу кукурузного крахмала/поливинилового спирта, чтобы создать интеллектуальную колориметрическую пленку и сделать ее доступной для мониторинга качества грибов. По мере увеличения времени хранения грибов колориметрическая пленка показывала изменения в фиолетовом, красновато-коричневом и розовом цвете, что соответственно указывает на постоянство качества, снижении качества и гниении грибов.

Датчики

Датчик, состоящий из компонентов идентификации, преобразования, электроники отображения сигнала и блока обработки сигналов, генерирует сигнал посредством взаимодействия компонента идентификации с веществом обнаружения, запуская модификацию рецептора и затем преобразовывая его в полезный

сигнал электронного инструмента, для отображения с помощью компонента преобразования (Zhang, Guo et al., 2021). В упаковке фруктов и овощей датчики могут реагировать на характерные вещества, высвобождаемые при метаболизме плодоовощного сырья (например, кислород, двуокись углерода, этилен и альдегиды), или на возможные эндогенные опасности (остатки пестицидов, токсины, микроорганизмы и т. д.), тем самым передавая информацию о качестве сырья (Fernandez et al., 2022). Кроме того, на основе обнаружения, некоторые датчики могут автоматически модулировать условия окружающей среды внутри упаковки, чтобы замедлить процесс порчи. Распознающие элементы датчиков в интеллектуальной упаковке для сырья могут взаимодействовать с аналитом как биологически, так и химически. Соответственно, типы сенсоров в интеллектуальной упаковке для овощей и фруктов можно разделить на биосенсоры и химические сенсоры.

Биосенсоры

Биосенсор — это датчик, в котором биоаналит функционирует как детектор, чей рецепторный слой распознавания обычно состоит из ферментов, антигенов, антител, нуклеиновых кислот фагов и т. д. (Kalpana et al., 2019). Он отслеживает свежесть продуктов, остатки пестицидов и биологическое загрязнение путем выявления и измерения аллергенов и аналитов. В настоящее время разработка биосенсоров в интеллектуальной упаковке для фруктов и овощей пока находится в начале пути, при этом существующие исследования сосредоточены на отслеживании изменений качества сырья (Maftoonazad & Ramaswamy, 2019), обнаружении остатков пестицидов (Deng et al., 2016), и мониторинга пищевых патогенов (Guo, Xue et al., 2022).

Порча плодоовощного сырья, как правило, происходит под воздействием различных бактерий и грибов, вызывая ферментирование сахара с образованием молочной кислоты, альдегидов, CO₂ и других побочных продуктов, что приводит к снижению pH и образованию постороннего вкуса. Используя технологию электростатического прядения, была создана чувствительная к pH биосенсорная подушка в режиме реального времени путем включения экстракта красной капусты в матрицу из поливинилового спирта, которую можно поместить в упаковку для фруктов. Результаты показывают, что биосенсор pH способен отображать значения pH в диапазоне 2–12 и что происходит цветовая реакция, связанная с качеством свежих плодов.

Патогенные бактерии пищевого происхождения, включая *Listeria monocytogenes*, *Salmonella enterica*, *Escherichia coli* и *Staphylococcus aureus*, представляют серьезную угрозу для здоровья человека (Zhang, Guo et

al., 2021), что стимулировало создание датчиков обнаружения микробов в пищевой промышленности. Нанощеточный граничный привод хитозан-аптамер использовался в исследованиях, чтобы показать сенсорный механизм для быстрого скрининга *L. monocytogenes* во фруктах и овощах, что позволило сенсору завершить обнаружение за 17 минут (Hills et al., 2018). Используя новый антиген OmpD, Mutreja et al. (2016) сконструировали биосенсор для обнаружения *Salmonella typhimurium*, сделав его доступным для зонда обнаружения в форме иммунологического анализа, который мог бы специфически идентифицировать *S. typhimurium* в образцах воды и сока. По аналогии с данным исследованием для обнаружения сальмонеллы также использовался другой маломощный микрожидкостный биосенсор на основе золотникового клапана, одноразового шприца и смартфона (Guo, Xue et al., 2022). Биосенсор на ацетилхолинэстеразу (АХЭ) был изготовлен Deng et al. (2016) с использованием хитозана, наночастиц золота и нанопористого псевдоуглерода, модифицированного перфторсульфоновой кислотой, в сочетании с послойной сборкой. Сенсор проявлял высокое сродство к субстратам АХЭ и распознавал метилпаратион с линейным диапазоном от $1,0 \times 10^{-8}$ до $1,0 \times 10^{-14}$ г/мл и пределом обнаружения $5,0 \times 10^{-15}$ г/мл, что указывает на то, что сенсор может быстро реагировать на фосфорорганические и метилпаратионные пестициды для обнаружения остатков пестицидов в соответствующих сельскохозяйственных продуктах

Химические датчики

Химические датчики основаны на реакции, происходящей между рецепторами и их мишенями, для создания сигналов, которые впоследствии обнаружения могут быть записаны и проанализированы. (Kalpana et al., 2019). Как указывалось ранее, газообразный состав свободного пространства упаковки сырья, который включает такие газы, как CO_2 , этилен и альдегиды, связан с дыханием продуктов, микробным метаболизмом или утечками газа как внутри, так и снаружи упаковки (Firouz et al., 2021). Эти вещества могут служить целевыми аналитами для химических сенсоров, взаимодействуя с рецептором для создания фотоэлектрического преобразования, которое создает сигнал, подобный цветовому преобразованию, связанный с концентрацией аналита, показывая изменения качества плодово-овощного сырья. Кроме того, с течением времени, химические датчики в интеллектуальной упаковке могут отслеживать изменения температуры и влажности, чтобы обеспечить сигнал хранения в дополнение к мониторингу концентрации газа.

Применение газовых датчиков для измерения концентрации O_2 или CO_2 и расчета частоты дыхания фруктов

и овощей является важным способом улучшения дизайна упаковки или поддержания идеальных условий для хранения сырья. Неразрушающие оптические датчики O_2 и два датчика CO_2 (один для определения низких концентраций, 0–3 %, другой для определения высоких концентраций, 40 %) были размещены Borchert et al. (2014) внутри контейнеров для хранения, с целью постоянного наблюдения за изменениями концентрации газа. Параметры датчика были связаны с физико-химическими и микробиологическими свойствами грибов во время хранения, что позволило оценить изменения качества. Как и в вышеупомянутом исследовании, сенсорная система была разработана для постоянного контроля содержания газа и частоты дыхания свежей клубники, что дает возможность для отслеживания в режиме реального времени при упаковке и транспортировке клубники, тем самым сводя к минимуму метаболические потери (Keshri et al., 2019).

Кроме того, несколько изучаемых в настоящее время химических сенсоров могут отслеживать выделение органических соединений во время созревания сырья для мониторинга свежести, а также степени зрелости. В ходе исследований была разработана колориметрическая сенсорная этикетка на основе метилового красного, прикрепленная к упаковке, которая показывала выделение альдегидов из яблок (Kim et al., 2018). Изменяя уровень pH с помощью химической реакции между альдегидами и гидроксидами, в условиях созревания цвет этикетки меняется с желтого на оранжевый, а затем на красный. Кроме того, в ходе исследования была изготовлена сенсорная система, способная контролировать выделение этилена за счет использования окислительно-восстановительной реакции между восстановлением этилена и ионом металла — Mo (VI), — которые подвержены изменению цвета, в сочетании с датчиком цвета (Lang & Hübert, 2012). Авторами сделан вывод о возможности применения датчика для измерения спелости яблок в отдельных плодах или картонных коробках при различных условиях хранения. В соответствии с предыдущим исследованием, другие ученые разработали колориметрический датчик, который можно было бы применять для обнаружения газообразного этилена, на основе комплексов красного палладия, получаемых за одну стадию из красного фенантролина и хлорида палладия (Hu, Li et al., 2016). Следует отметить, что этот тип хемосенсора похож на колориметрические индикаторные метки по тому, как он реагирует, обе используют изменение pH хромогенного красителя для его отражения. Отличие состоит в том, что химические датчики содержат целевые рецепторы, которые реагируют на целевой метаболит, генерируя сигналы, которые можно улавливать и анализировать, что позволяет повысить чувствительность реакции. Подобным образом могут быть созданы датчики реакции, адаптированные к отслеживаемому химическому веществу, например,

CO₂-датчики, датчики этилена и колориметрические датчики альдегида. Кроме того, их наличие упрощает включение химических датчиков в интеллектуальные устройства для обмена данными с несколькими терминалами.

Условия температуры и влажности, в которых хранится плодовоовощное сырье оказывают огромное влияние на их качество и срок годности. Высокая относительная влажность и колебания температуры могут спровоцировать конденсацию воды, что, в свою очередь, вызывает рост микробов, ускоряет ухудшение текстуры фруктов и овощей и приводит к запотеванию внутренней части упаковки, что влияет на решение потребителя о покупке. Несколько датчиков, большинство из которых связаны с индикаторами время-температура (ТТИ), были использованы для предотвращения внутренних и внешних факторов окружающей среды, таких как температура и относительная влажность, которые можно рассматривать как компонент интеллектуальных приложений для упаковки (Gao et al., 2020; Rahman et al., 2018).

Подводя итог, следует отметить, что химические датчики, контролирующие газы, могут отслеживать физиологические изменения сырья вместе с концентрацией летучих веществ, образующихся в результате микробной активности, тогда как негазовые датчики могут регулировать внешнюю среду во время хранения и транспортировки фруктов и овощей преимущественно за счет измерения температуры и влажности.

Индикатор время–температура

Температура и время хранения оказывают значительное влияние на органолептические свойства и пищевую ценность сырья, а также его микробиологическую обсемененность (Zhang, Guo et al., 2021). ТТИ как эффективные инструменты мониторинга температуры используются для регистрации колебаний температуры в цепочке поставок пищевых продуктов для отслеживания качества и безопасности пищевых продуктов (Pereira et al., 2015). Сопоставляя действие ТТИ (объединяющее цвет, кислотность, длину диффузии и т. д.) с качеством пищевого продукта, ТТИ можно увязать со сроком годности целевого пищевого продукта, используя принципы, включая микробные, ферментативные или электрохимические изменения, в сочетании с математическим моделированием. Процесс порчи пищевых продуктов, вызванной микроорганизмами или биохимией, в основном соответствует уравнению Аррениуса, связанному со скоростью реакции и температурой (Gao et al., 2020). При абсолютном значении разности между энергией активации пищевого продукта и энергией активации ТТИ не более 25 кДж/моль предполагают, что энергия активации (E_a) пищевого продукта, рассчитанная по уравнению Аррениуса, может быть близко к E_a ТТИ, который эффективен

для прогнозирования качества целевого продукта питания (Gao et al., 2020).

Основываясь на ферментативных реакциях в живых организмах, для создания электрического и колориметрического ответа ТТИ был изготовлен путем использования каталитической реакции глюкозооксидазы (Rahman et al., 2018). pH раствора снижается, когда глюкозооксидаза реагирует с D-глюкозой с образованием D-глюконовой кислоты, H₂O₂, и последующее выделение H⁺ из D-глюконовой кислоты в растворе, что может вызвать изменение цвета в растворе. Индикатор pH (метиловый красный), отражающий изменения качества пищевых продуктов. Ток можно измерить с помощью измерителя постоянного потенциала, чтобы подтвердить образование H₂O₂. Энергия активации по Аррениусу для текущей реакции оказалась равной $25,0 \pm 1,6$ кДж/моль, а E_a для реакции развития окраски — $24,2 \pm 0,6$ кДж/моль, их сходство свидетельствует о согласии в предсказании качества пищевых продуктов между электрическим сигналом и изменением цвета. То есть разница в E_a между этим ферментативным ТТИ и качеством пищевых продуктов составляла менее 25 кДж/моль и, следовательно, могла использоваться для прогнозирования качества целевых фруктов и овощей, замороженного лука и клубники.

В исследованиях также изучалась возможность микробного ТТИ для обнаружения порчи сырья с учетом связи микробного ТТИ с температурно-зависимым ростом микробов и синтезом метаболитов (Zhang, Guo et al., 2021). Adiani et al. разработали ТТИ, который можно применять для мониторинга микробиологической порчи фруктов с минимальной обработкой (ананас, гранат, ананасовый нектар), в которых использовали изменение интенсивности цвета со временем и температурой в результате окисления фенола в присутствии карбоната натрия и персульфата аммония (APS; инициатор свободных радикалов). Было показано, что изменение цвета этого ТТИ сравнимо с E_a плода и положительно коррелирует с микробным ростом трех плодов. Разработанный ТТИ может быть добавлен к упаковке пищевых продуктов для неразрушающей, бесконтактной индикации изменений качества фруктов, что является перспективной интеллектуальной упаковкой для фруктов и овощей. ТТИ на основе диффузии также применялся для прогнозирования качества фруктов (киви, клубники и манго) во время хранения (Yang & Xu, 2021). Этот диффузионный ТТИ состоит из функционального слоя и индикаторного слоя, при этом изменение цвета среднего индикаторного слоя указывает на влияние окружающей температуры. ТТИ запускается, и цветопроявляющие элементы в функциональном слое диффундируют в индикаторный слой, когда индикаторный слой и функциональный слой соприкасаются. В зависимости от температуры и времени цвет индикаторного слоя меняется от белого до синего.

В ходе исследования было установлено несколько прогностических моделей, основанных на значениях красного, зеленого и синего (RGB) и в сочетании с качеством фруктов. Результаты показали, что температура и время хранения оказали заметное влияние на изменение цвета ТТИ и качество плодов. Кроме того, цветовая реакция этого ТТИ предсказывала потерю веса, содержание растворимых сухих веществ, содержание витамина С, титруемую кислотность, и антиоксидантная способность трех плодов с ошибкой менее 15 %. Более того, расхождения между цветовой реакцией ТТИ и изменениями качества фруктов были менее 25 кДж/моль, что в совокупности свидетельствует о том, что ТТИ может использоваться для отслеживания качества этих фруктов.

Будущие исследования ТТИ должны быть направлены на сопоставление большего количества индикаторов ухудшения процессов порчи пищевых продуктов (охватывающих ферментативные реакции, потемнение, окисление и т. д.), чтобы обеспечить интеграцию нескольких параметров качества и предоставление исчерпывающей информации о сроке годности пищевых продуктов.

Метка радиочастотной идентификации (RFID)

Указанные выше колориметрические индикаторные этикетки, датчики и ТТИ, как составляющие интеллектуальной упаковки, способны отображать информацию об изменении качества фруктов и овощей, которая также может быть передана потребителю через считывающее устройство носителя информации. Интеллектуальная упаковка значительно выиграла от достижений RFID в идентификации качества и порчи, мониторинге всего процесса холодовой цепи, а также управлением

температурой и влажностью. Например, интеграция датчиков контроля и метки RFID расширяет возможности технологии RFID в качестве интеллектуальной упаковки для фруктов и овощей. Качество фруктов и овощей постоянно меняется в процессе транспортировки и распределения из-за их постоянной физиологической активности. Vergara et al. (2007) выпустили считыватель микро-RFID со встроенным микромеханическим датчиком газа оксида металла для отслеживания изменений свежести яблок во время транспортировки и распределения. Комбинация этих RFID с датчиками газа, способными указывать на свежесть, должна быть изучена более подробно, чтобы получить более надежные данные. Кроме того, температура и влажность являются наиболее важными элементами, влияющими на безопасность и качество пищевых продуктов при их распределении и хранении. Было доказано, что метки RFID имеют большой потенциал для применения в мониторинге логистики холодовой цепи для фруктов и овощей. В этом проекте контроль температуры и влажности при хранении фруктов в холодильнике осуществлялся с использованием RFID и сетей беспроводных датчиков (Badia-Melis et al., 2015). Точно так же Alfian et al. (2020) предложили систему отслеживания, включающую технологию RFID для отслеживания скоропортящихся пищевых продуктов и датчики для измерения условий окружающей среды, таких как температура и влажность скоропортящихся пищевых продуктов при хранении и транспортировке, что позволяет эффективно бороться с контрафактными и некачественными продуктами в цепочке поставок. Однако, высокая стоимость RFID (Han et al., 2018) и проблемы экологической безопасности при переработке являются препятствиями для внедрения технологии, которая ограничивает промышленное внедрение (Bibi et al., 2017). Некоторые выпускаемые и применяемые промышленные системы ТТИ и RFID представлена в Таблице 2.

Таблица 2
Краткий перечень промышленных интеллектуальных упаковочных систем для фруктов и овощей

Наименование	Категория	Функциональное назначение	Основные характеристики	Литература
Ripe Sense®	Метки индикаторов	Определяет спелость плода по характерному газу (этилену), образующемуся при созревании. Этикетка становится красной, когда плод твердый и не полностью созревший; когда плод полностью созрел, оранжево-желтый (лучшее время для употребления в пищу).	Индикатор действует как датчик созревания и используется на упаковке таких фруктов, как киви, дыни, манго и груши.	(Firouz et al., 2021)
Vitsab CheckPoint®	Метки ТТИ на основе ферментов	Метки ТТИ можно активировать, слегка надавив на «окно», которое запускает ферментативную реакцию между ферментом и субстратом. CheckPoint — ферментативный ИТИ производства Vitsab International AB (Швеция), меняющий цвет при снижении значения pH.	Изменение цвета центрального круга «КПП»: зелено-желто-оранжево-красное. Зеленый: упакованные продукты транспортировались и хранились в хороших условиях. Оранжевый/красный: продукт стал неприемлемым.	(Han et al., 2018)

Окончание Таблицы 2

Наименование	Категория	Функциональное назначение	Основные характеристики	Литература
Smart Dot(умная точка)	Химически активный ТТИ	Smart Dot производства EVIGENCE SENSORS (Израиль) демонстрирует отчетливое изменение цвета за счет накопления изменений времени и температуры. Светло-зеленый (12 ч)–темно-зеленый (24 ч)–коричневый (36 ч)–красный (48 ч).	Этот ТТИ предоставляет производителям, розничным торговцам и потребителям в цепочке поставок продуктов питания возможность отслеживать срок годности скоропортящихся продуктов в режиме реального времени.	(Zhang, Guo et al., 2021)
Monitor Mark™	Диффузионный ТТИ	ТТИ обеспечивает непрерывную запись воздействия на продукт нежелательных температур во время хранения. Индикатор обеспечивает контрастность в различных оттенках синего, когда пища подвергается воздействию высоких температур. Для наблюдения за изменением качества свежавыжатых непастеризованных соков (яблочный, апельсиновый, морковный, свекольный), хранящихся в различных условиях.	Индикаторы не имеют прямого контакта с самим продуктом, они просто контролируют и отображают условия хранения. Стабильное изменение цвета ТТИ с необратимыми изменениями цвета. Информация, необходимая для оценки условий хранения и транспортировки.	(Firouz et al., 2021)
Freshness TTI	ТТИ	Изготовлен из гелеобразного прозрачного материала с цветовой индикацией и нанесенным на товар штрих-кодом. Форма штрих-кода со временем уменьшается до тех пор, пока он не исчезнет/не перестанет блестеть, что указывает на снижение свежести.	В супермаркетах, где сложены большие количества овощей и фруктов, чтобы покупатели могли определить свежесть скоропортящихся продуктов. Порча фруктов и овощей, из-за которой этикетка со штрих-кодом не считывается сканером.	(Firouz et al., 2021)
Verigo Pod quality	RFID в сочетании с датчиками	Интеллектуальная упаковка, система логистики: оценка оставшегося срока использования продукта и определение приоритетов логистики в соответствии с его характеристиками и условиями окружающей среды.	Показана взаимосвязь между порчей клубники и температурой хранения, и соответственно можно оценить оставшийся срок годности. Для клубники, упакованной при температуре от 0 до 2°C, продолжительность срока годности оценивается в 8,9 дней. Срок годности клубники, упакованной при температуре от 2 до 10 °C, примерно 2,6 дня	(Fernandez et al., 2022).

Практическое применение интеллектуальной упаковки для овощей и фруктов

Физиологическая активность фруктов и овощей после сбора урожая может генерировать метаболиты, содержащие двуокись углерода, органические кислоты, этилен, летучие альдегиды и кетоны, вызывая необратимые сдвиги в среде хранения сырья, особенно изменения pH. Это изменение может быть связано со снижением качества за счет изменения цвета, вызванного чувствительными к pH красителями (Bhargava et al., 2020; Zheng et al., 2022). Анализ литературных источников показал, что интеллектуальная упаковка может использоваться

для различных продуктов питания и напитков, включая киви (Shao et al., 2022), дыню (Lu et al., 2018), драконий фрукт (Warsiki & Rofifah, 2018), гуава (Kuswandi et al., 2013), виноград (Kuswandi & Murdyaningsih, 2017), личи (Zhou et al., 2021), манго (Dirpan et al., 2018), финики (Maftoonazad & Ramaswamy, 2019), перец (Chen et al., 2018), грибы (Liu, Wu et al., 2022) и др. Авторы Dirpan et al. (2018) создали индикатор свежести манго с использованием бактериальной целлюлозы в сочетании с красителем бромфеноловым синим, изменение цвета которого отражало колебания pH внутри упаковки манго и, следовательно, указывало на его свежесть (темно-синий для свежих фруктов, светло-синий для твердых фруктов и зеленый для гнилых). фруктов). Учитывая, что нату-

ральные красители pH больше подходят для контроля свежести пищевых продуктов из-за их нетоксичного, биоразлагаемого характера (Bhargava et al., 2020; Zheng et al., 2022). Группа ученых Zhou et al. (2021) изготовили смарт-этикетку из целлюлозных нановолокон, содержащую антоцианы черники, с помощью технологии коаксиальной 3D-печати и загрузили хитозан, содержащий 1-MCP, в полые микроканалы волокон для контролируемого высвобождения. В рамках проекта была впервые создана интеллектуальная этикетка с сохранением свежести и колориметрической индикацией pH, способная продлить срок хранения личи до 6 дней при температуре 25°C и 75 % относительной влажности в сочетании с изменением цвета для обозначения свежести. Следует отметить, что это данное исследование служит основой для будущих интеллектуальных технологий упаковки фруктов и овощей, а именно инновационной упаковки с двойными функциями сохранения сырья (например, антибактериальная, влагопоглощающая) и интеллектуальным реагированием (Zhang, Guo et al., 2021).

Стоит отметить эффективность проекта по мониторингу качества киви, клубники и манго во время хранения с использованием изменения цвета подготовленного TTI на основе диффузии в сочетании с разработанной моделью прогнозирования качества (Yang & Xu, 2021).

Контроль спелости фруктов и овощей

Фрукты и овощи претерпевают множество физиологических и биохимических изменений в процессе созревания, которые проявляются в повышении сладости (от распада органических кислот и превращения крахмала в сахар), аромата (от образования ароматических летучих веществ), соединений), снижение плотности (из-за потери набухания клеток, превращения пектина и разрушения компонентов клеточной стенки) и изменение цвета (нарушение выработки пигмента) (Pirsa et al., 2022). Отслеживание сохранности сырья имеет решающее значение для повышения безопасности, сокращения отходов и минимизации финансовых потерь. Следует отметить, что эстетический вид (изменение цвета) некоторых фруктов и овощей, таких как помидоры, апельсины и бананы, может указывать на степень зрелости. Однако спелость большинства фруктов (таких как яблоки, груши и киви) можно определить только по конкретным показателям, таким как отслеживание изменений в этилене и летучих альдегидах.

Производство этилена в плодах в период созревания резко возрастает, что влечет за собой повышенную скорость автокатализа и дыхания (Hu, Sun et al., 2019). Были созданы индикаторные этикетки на молибдате аммония, чувствительные к этилену, залитые в полимерную матрицу, которые могли обнаруживать 100 частей

на миллион чистого газообразного этилена (Iskandar et al., 2020). После этого на упаковку авокадо были нанесены индикаторные этикетки, демонстрирующие переход цвета в соответствии с образцами зрелости авокадо и качества плода. Сравнительные исследования (Hu, Li et al., 2016; Lang & Hübert, 2012; Nguyen et al., 2020; Pirsa & Chavoshizadeh, 2018; Valente et al., 2019) также выполнялись другими учеными для оценки зрелости плодов с использованием произведенного этилена. Существуют интеллектуальные пленки, которые используют этилен для изменения зрелости. В исследовании, проведенном недавно Yao et al. (2022), была успешно создана интеллектуальная хитозановая пленка для неразрушающего контроля и длительного выделения этилена. Комбинация PALS, ACM и рамановской спектроскопии показала, что пленка винилхлорид/хитозан продолжала выделять газообразный этилен при комнатной температуре в течение 10 дней, что объясняется накоплением газообразного этилена в результате разложения винилхлорида в композитной пленке и образованием небольших полых структур для выполнения функции медленного высвобождения. Исследованием также установлено, что можно управлять периодами созревания манго и бананов по запросу, что дает преимущества в сохранении и созревании сельскохозяйственных продуктов.

Наравне с этим проводятся эксперименты с интеллектуальной упаковкой, которая отслеживает изменения уровней летучих альдегидов и серы, чтобы указать на спелость фруктов и овощей, однако оба они ограничены определенными видами продуктов. Так, например, киви (Liu, Ma et al., 2021) и яблоки (Kim et al., 2018) выделяют значительное количество альдегидов по мере созревания, поэтому в исследованиях использовалось аддитивное взаимодействие между альдегидами и основаниями с целью изменения pH среды упаковки для создания интеллектуальной упаковки. В настоящее время определение зрелости фруктов и овощей сводится к интеллектуальным подходам, основанным на данных, преимуществами которых являются практичность, непрерывность, работа в режиме реального времени и промышленная масштабируемость.

Измерение качества и безопасности

Опасения по поводу качества и безопасности фруктов и овощей часто связаны с остатками пестицидов, микробиологической порчей и заражением. Помимо обычного хроматографического и масс-спектрометрического обнаружения (Umapathi et al., 2022), для решения этих вопросов было использовано несколько интеллектуальных методов обнаружения, включая колориметрические индикаторные метки (Kaewnu et al., 2022), TTI (Adiani et al., 2021) и биосенсоры (Deng et al., 2016; Hills et al., 2018). Пестициды могут задерживаться и проникать в пище-

вую цепочку в результате их чрезмерного использования для борьбы с вредителями в течение вегетационного периода сырья, создавая постоянно растущую угрозу для здоровья человека, что стало серьезной проблемой общественного здравоохранения (Umapathi et al., 2022). Следовательно, биосенсоры также могут использоваться для обнаружения остатков пестицидов в свежих фруктах и овощах. В ходе исследования был создан новый бионический электрохимический датчик с использованием мембран с молекулярным отпечатком в качестве компонентов распознавания для быстрого обнаружения ацетамиприда и трихлорфона в образцах фасоли и огурцов (Tang et al., 2014).

Овощное и фруктовое сырье и продукция их переработки особенно восприимчивы к микробному загрязнению, поэтому ТП включали в упаковку для оценки испытаний на микробиологическую безопасность. Изготовили простой и недорогой ТП, основанный на изменении цвета в результате неферментативных процессов окислительного потемнения фенола. Объединяя оценку кинетики микробной порчи микрообработанных ананасов, гранатов и ананасового сока с цифровой однообъективной зеркальной камерой (DSLR), была построена модель, коррелирующая рост микробов с развитием окраски, как эффективное средство интеллектуального микробиологического мониторинга фруктов (Kaewnu et al., 2022).

Регулирование условий хранения фруктов и овощей

Параметры окружающей среды имеют решающее значение для качества фруктов и овощей, включая атмосферу с концентрацией газов этилена, O_2 и CO_2 , а также условия температуры и влажности. Частота дыхания и ее вариации, обычно измеряемые путем анализа потребления O_2 или производства CO_2 в единицу времени, в значительной степени способствуют поддержанию качества после сбора урожая, поэтому они являются важным параметром для контроля продления срока годности сырья (Keshri et al., 2019, 2020). Таким образом, оценка частоты дыхания является незаменимым инструментом для оптимизации конструкции упаковочных систем и поддержания оптимальных условий в системе хранения. В интеллектуальной упаковке для плодовоовощного сырья датчики газа часто встраиваются в упаковку с регулируемым газом, чтобы обеспечить динамическое управление составом газа в режиме реального времени для регулирования метаболизма фруктов и овощей. Датчик O_2 (0–25 %), два датчика CO_2 (0–0,5 % и 0–5 %) и модульный респирометр были использованы для создания системы непрерывного мониторинга концентрации газа и частоты дыхания в режиме реального времени свежих продуктов (Keshri et al., 2019).

Затем устройство подвергали испытанию последовательно с использованием клубники в измененных атмосферных условиях и условиях хранения в отсутствие окружающего воздуха и с постепенным снижением объемной доли O_2 с 21 % до 16 %, 8 %, 4 %, 2 % и 1 % (уравновешивается N_2). Результаты показали, что предлагаемое устройство может быстро и точно определять скорость дыхания свежих продуктов, таких как клубника, в режиме реального времени, облегчая регулирование газовой атмосферы хранения сырья. Позже ученые сообщили о непрерывном мониторинге концентрации яблочного газа и частоты дыхания яблок в различных условиях хранения и в течение всего периода хранения с помощью газовых датчиков и модульных респирометров (Keshri et al., 2020).

Кроме того, учитывая, что концентрация этилена в среде послеуборочного хранения является одним из наиболее важных факторов, влияющих на созревание и сохранение фруктов и овощей, было проведено несколько исследований по мониторингу концентрации газообразного этилена. Этиленовые пленки с медленным высвобождением были разработаны для регулирования условий хранения манго и бананов и контроля созревания фруктов (Yao et al., 2022). Следует отметить, что интеллектуальный мониторинг газовой атмосферы в основном ограничивается периодом хранения, и в будущем потребуются дополнительные исследования, чтобы обеспечить контроль газовой ситуации в условиях транспортировки и упаковки для обслуживания всей цепочки поставок плодовоовощного сырья.

Температура и влажность среды хранения являются наиболее важными параметрами, определяющими послеуборочную жизнь плодов после их сбора. В настоящее время несколько ТП, которые могут отслеживать изменения температуры окружающей среды, широко используются во время хранения или внутри упаковки для мониторинга в режиме реального времени (Gao et al., 2020). Исходя из этого, можно регулировать параметры окружающей среды в соответствии с температурой плодов, чтобы продлить срок их хранения после сбора урожая. Упаковка, способная контролировать и регулировать влажность, вызвала интерес исследователей (Liang et al., 2022; Pirsá, 2021). Кроме того, разработка интеллектуальной упаковки для фруктов и овощей получила развитие в результате открытия новых материалов. Металлоорганические каркасы (MOF) представляют собой группу пористых материалов с большой площадью поверхности и переменным размером пор, что делает их доступными для адсорбции молекул воды из окружающей среды упаковки для адаптивной реакции на влажность (Liang et al., 2022; Wang et al., 2021). Многофункциональная композитная бумага Ag-MOFs@CMFP (это относится к наполненной карбоксиметильной фильтровальной бумаге многофункциональным

MOF на основе серебра) была синтезирована *in situ* для использования в качестве чувствительного к влаге материала для измерения качества фруктов и одновременного сохранения свежести (Zhang et al., 2022). Поскольку физиологические процессы фруктов изменяют относительную влажность микроокружения упаковки, больше молекул воды адсорбируется на Ag-MOF, что соответственно изменяет устойчивость Ag-MOFs@CMFP. Этот ответный сигнал влажности может быть передан на смартфон, что позволяет осуществлять удаленный беспроводной мониторинг в режиме реального времени влажности окружающей среды упаковки фруктов (клубника, виноград, сливы). В этой работе предложена новая концепция использования гибких сенсорных материалов для обнаружения влаги и сохранения фруктов, которая может способствовать прогрессу в интегрированном мониторинге влажности и упаковке для сохранения в цепочке поставок фруктов, овощей и других сельскохозяйственных продуктов.

Отслеживание и интеллектуальный интерактивный опыт

В настоящее время доступно множество интеллектуальных систем идентификации, включая QR-коды и RFID-метки, для отслеживания источника продукции и мониторинга процессов (Alfian et al., 2020; Bibi et al., 2017). В исследовании сочетание технологии RFID с датчиками IoT позволило отслеживать условия температуры и влажности, а также прослеживаемость в цепочке поставок кимчи, тем самым предотвратив продажу поддельных товаров (Alfian et al., 2020). Кроме того, команда дизайнеров объединила использование QR-кодов и смарт-тегов RFID для создания «Файла фермера», интеллектуального интерактивного приложения, которое позволяет пользователям сканировать QR-код или RFID-метку на упаковке фруктов с помощью смартфона, чтобы получить доступ ко всей информации о фруктах и овощах, включая различные характеристики, среду происхождения, процесс созревания, каналы сбыта, который представляет собой дизайн, содержащий информацию об отслеживаемости с интеллектуальной интерактивной упаковкой (Zhang & Chen, 2021). Следует отметить, что дизайн упаковки NONGFU SPRING 17.5° Orange, выпущенной в 2014 году, включает в себя современную интеллектуальную технологию отслеживания упаковки, которая позволяет потребителям сканировать QR-код на апельсинах для получения информации о продукте, например информации о росте (Nongfuspring, 2022). Кроме того, информация об отслеживаемости влечет за собой видео с производственной линии апельсина 17,5, которое повышает качество обслуживания потребителей и служит препятствием для контрафактной продукции. Вполне очевидно, что каждый из этих дизайнов воплощает в себе вклад интеллектуального ди-

зайна упаковки фруктов и овощей в прослеживаемость, эффективный мониторинг и управление продуктами, а также в улучшение интеллектуального и интерактивного взаимодействия между потребителем и продуктом, что станет тенденцией развития упаковки. в эпоху информационных технологий.

Проблемы и перспективы использования и промышленного внедрения интеллектуальной упаковки для фруктов и овощей

Интеллектуальные упаковочные системы новая область пищевой упаковки, которая применяют для мониторинга в режиме реального времени продуктов, начиная от фруктов и овощей и заканчивая мясными и молочными продуктами в цепочке поставок. Это происходит посредством взаимодействия между небольшими компонентами внутри упаковки (например, колориметрические индикаторные этикетки, датчики) и целевые ответчики для предоставления поставщикам и потребителям точной информации о качестве продукта и окружающей среды. Несмотря на многие достоинства такой инновационной упаковки для пищевых продуктов, включающей в себя повышение эффективности использования сырья, снижение проблем с безопасностью пищевых продуктов и минимизацию отходов (Cheng et al., 2022), предстоит решить многочисленные препятствия для расширения промышленного внедрения интеллектуальной упаковки для плодовоовощного сырья.

Основные препятствия для расширения промышленного внедрения интеллектуальной упаковки для плодовоовощного сырья

Оценка безопасности интеллектуальной упаковки

В первую очередь необходимо учитывать безопасность интеллектуальных компонентов упаковки, включая миграцию химических красителей в колориметрических индикаторных этикетках и химических датчиках, а также возможность химического взаимодействия между интеллектуальными упаковочными материалами и пищевыми компонентами. В связи с этим использование природных колориметрических индикаторов (природных красителей с участием антоцианов, свекловичных пигментов, куркумина и др., природных полимеров, содержащих полисахариды и белки), а также подбор нетоксичных и неопасных материалов может эффективно повысить надежность интеллектуальных упаковочных материалов, что является направлением для будущих научных исследований.

Чувствительность отклика и достоверность интеллектуальной упаковки

Во-первых, один из способов, с помощью которого интеллектуальная упаковка отслеживает различия в качестве овощей и фруктов, заключается в мониторинге их метаболитов по мере их созревания, старения и деградации. Таким образом, эффективность интеллектуального мониторинга упаковки сильно ограничена чувствительностью ответа к этим целевым метаболитам. Интеллектуальная упаковка сырья, скорее всего, будет использовать CO_2 , летучие вещества, этилен, температуру и влажность в качестве целей отслеживания, поскольку эти вещества часто подвержены внешним воздействиям, которые могут вызвать колебания точности индикатора. Таким образом, в приоритете будущих исследований должны быть множественные/комбинированные показатели для мониторинга метаболитов, отчасти потому, что различия в качестве фруктов и овощей, как правило, являются комбинацией многочисленных факторов, а не изменениями одного показателя. С другой стороны, способность хромогенных красителей соответствовать изменениям качества целевого продукта является препятствием для их продвижения, поскольку они в основном используются в нескольких сложных пакетах для обнаружения изменений в свежести и зрелости сырья. Гибридные хромогенные агенты могут расширить диапазон цветовых сдвигов и более оперативно отслеживать изменения качества по сравнению с отдельными хромогенными агентами. Кроме того, необходимо уделить приоритетное внимание дальнейшим исследованиям того, как улучшить стабильность развития цвета в композитных системах при использовании натуральных красителей в качестве хромогенных агентов, например, путем стабилизации полисахаридно-белковых наноконплексов антоцианов (Liu, Wu et al., 2022).

Повышение эффективности упаковочного материала

Многочисленные природные макромолекулярные полимеры, такие как хитозан, целлюлоза и крахмал, используются в качестве индикаторных этикеточных материалов для интеллектуальной упаковки. Механические свойства и свойства водонепроницаемости являются ключевыми показателями для определения эффективности использования интеллектуальной пленки или метки. Прочность на разрыв и удлинение при разрыве интеллектуальных этикеток обычно можно увеличить за счет физического сшивания и других взаимодействий между материальными подложками. Существует проблема влагостойкости интеллектуальных пленок и этикеток из-за высокой гидрофильности некоторых природных макромолекул, используемых для создания интеллектуальной упаковки. Решением являются

использование нанотехнологии или комбинирование гидрофобных материалов. Кроме того, возможность использования вторичной переработки и экологичность материалов — это то, что необходимо изучить в будущих исследованиях. В качестве источника органических макромолекул (таких как пленкообразующие соединения целлюлоза, пектин и хитозан) или биологических компонентов для создания интеллектуальной упаковки (пигменты, содержащие антоцианы и куркумин, активные вещества, в том числе полифенолы и растительные эфирные масла) целесообразно использовать растительные отходы. Проведение дальнейших исследований по применению отходов будет способствовать увеличению эффективности и снижению затрат на производство интеллектуальной упаковки.

Затраты на производство интеллектуальной упаковки

В настоящее время производство интеллектуальной упаковки для фруктов и овощей преимущественно сосредоточено в небольших лабораториях без учета производственных затрат. Экономически обоснованная цена умной упаковки не должна превышать 10 % от общей стоимости продукта. Однако осуществить промышленное внедрение интеллектуальной упаковки сложно, поскольку включение компонентов интеллектуального индикатора неизбежно влечет увеличение затрат. Таким образом, чтобы снизить стоимость интеллектуальных упаковочных материалов, обработки и сделать их более доступными для возможности промышленного использования потребуются дополнительные и более глубокие исследования.

Вопросы правового регулирования и принятие потребителями

Наряду с препятствиями на пути промышленного производства интеллектуальной упаковки существуют также нерешенные вопросы, которые необходимо принять во внимание, такие как, восприятие потребителей и правовое регулирование интеллектуальной упаковки. Отсутствие достаточного законодательного регулирования интеллектуальных систем упаковки в настоящее время также препятствует внедрению новой упаковки. Общие спецификации для всех материалов, контактирующих с пищевыми продуктами, изложены в Регламенте ЕС ЕС 1935/2004, первом законодательном акте, посвященном теме активных и интеллектуальных материалов. В рамочном регламенте, в статьях 3, 4 и 15. особое внимание уделяется правилам использования интеллектуальных упаковочных материалов. Требования к упаковочным материалам с интеллектуальными компонентами, а также безопасное и надлежащее приме-

нение активных и интеллектуальных материалов и изделий потребителями находится в стадии обсуждения и законодательно не установлено. Кроме того, правила интеллектуальной упаковки для других стран и регионов, а также внедрение межрегиональных правил еще не разработаны. Хотя некоторые формы интеллектуальной упаковки, такие как индикаторные этикетки из натуральных полимеров и красок, признаны безопасными, на восприятие упаковки потребителями также влияет включение несъедобных веществ в интеллектуальную упаковку и возможность миграции ингредиентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интеллектуальная технология упаковки разработана и используется для мониторинга качества фруктов и овощей, безопасности и условий окружающей среды в режиме реального времени, как для быстрого выявления дефектов качества фруктов и овощей, так и для предоставления визуальной и актуальной информации (свежесть, спелость, качество, безопасность, прослеживаемость и др.). Необходимо отметить, что, активная упаковка может быть включена в интеллектуальные упаковочные системы для обеспечения более эффективного контроля качества, оказывая при этом антибактериальное, антиоксидантное и другие защитные свойства. При этом необходимо учитывать, что различия в качестве фруктов и овощей часто представляют собой нечто большее, чем просто изменение одного метаболита и поэтому, для более точного учета изменений в свежести, степени зрелости и т. д. фруктов и овощей необходимо применять перспективный ответчик с уче-

том сводного индекса для отслеживания нескольких метаболитов. Широкому внедрению интеллектуальной упаковки для фруктов и овощей в промышленное производство и систему продаж будет способствовать решение проблем, связанных с оценкой безопасности, правовым регулированием, управлением затратами и другими факторами. Представленный научный обзор о целевых устройствах реагирования, которые можно применять к интеллектуальной упаковке для мониторинга качества фруктов и овощей, включая CO_2 , летучие органические кислоты, летучие соединения альдегида/серы, этилен и другие метаболиты может быть использован при проведении дальнейших научных исследований, с целью разработки эффективной интеллектуальной упаковки для отслеживания качества фруктов и овощей.

ВКЛАД АВТОРОВ:

Бурак Л.Ч.: концептуализация, разработка методологии исследования, научное руководство исследованием, проведение исследования, написание-рецензирование и редактирование рукописи.

Писарик М.И.: валидация данных, написание, подготовка черновика рукописи, курирование данных, работа с программным обеспечением.

Сарач А.Н.: проведение исследования, работа с программным обеспечением, валидация данных, редактирование рукописи.

ЛИТЕРАТУРА

- Adiani, V., Gupta, S., & Variyar, P. S. (2021). A simple time temperature indicator for real time microbial assessment in minimally processed fruits. *Journal of Food Engineering*, 311, 110731. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110731>
- Alam, A. U., Rath, P., Beshai, H., Sarabha, G. K., & Deen, M. J. (2021). Fruit quality monitoring with smart packaging. *Sensors*, 21(4), 1509. <https://doi.org/10.3390/s21041509>
- Alegbeleye, O., Odeyemi, O. A., Strateva, M., & Stratev, D. (2022). Microbial spoilage of vegetables, fruits and cereals. *Applied Food Research*, 2(1), 100122. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100122>
- Alfian, G., Syafrudin, M., Farooq, U., Ma'arif, M. R., Syaek-honi, M. A., Fitriyani, N. L., Lee, J., & Rhee, J. (2020). Improving efficiency of RFID-based traceability system for perishable food by utilizing IoT sensors and machine learning model. *Food Control*, 110, 107016. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.107016>
- Almasi, H., Forghani, S., & Moradi, M. (2022). Recent advances on intelligent food freshness indicators; an update on natural colorants and methods of preparation. *Food Packaging and Shelf Life*, 32, 100839. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100839>
- Ardiansyah, Kurnianto, M. F., Poerwanto, B., Wahyono, A., Apriliyanti, M. W., & Lestari, I. P. (2020). Monitoring of banana deteriorations using intelligent-packaging containing brazilian extract (*Caesalpinia sappan* L.). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 411(1), 012043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/411/1/012043>
- Badia-Melis, R., Ruiz-Garcia, L., Garcia-Hierro, J., & Villalba, J. I. R. (2015). Refrigerated fruit storage monitoring combining two different wireless sensing technologies:

- RFID and WSN. *Sensors*, 15(3), 4781–4795. <https://doi.org/10.3390/s150304781>
- Baek, S., Maruthupandy, M., Lee, K., Kim, D., & Seo, J. (2020). Freshness indicator for monitoring changes in quality of packaged kimchi during storage. *Food Packaging and Shelf Life*, 25, 100528. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100528>
- Balbinot-Alfaro, E., Craveiro, D. V., Lima, K. O., Costa, H. L. G., Lopes, D. R., & Prentice, C. (2019). Intelligent packaging with pH indicator potential. *Food Engineering Reviews*, 11(4), 235–244. <https://doi.org/10.1007/s12393-019-09198-9>
- Bashir, H. A., & Abu-Goukh, A.-B. A. (2003). Compositional changes during guava fruit ripening. *Food Chemistry*, 80(4), 557–563. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00345-X](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00345-X)
- Becerril, R., Nerín, C., & Silva, F. (2021). Bring some colour to your package: Freshness indicators based on anthocyanin extracts. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 495–505. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.042>
- Betemps, D. L., Fachinello, J. C., Galarça, S. P., Portela, N. M., Remorini, D., Massai, R., & Agati, G. (2012). Non-destructive evaluation of ripening and quality traits in apples using a multiparametric fluorescence sensor. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 92(9), 1855–1864. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5552>
- Bhargava, N., Sharanagat, V. S., Mor, R. S., & Kumar, K. (2020). Active and intelligent biodegradable packaging films using food and food waste-derived bioactive compounds: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 105, 385–401. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.015>
- Bibi, F., Guillaume, C., Gontard, N., & Sorli, B. (2017). A review: RFID technology having sensing aptitudes for food industry and their contribution to tracking and monitoring of food products. *Trends in Food Science & Technology*, 62, 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.01.013>
- Bobelyn, E., Hertog, M. L. A. T. M., & Nicolai, B. M. (2006). Applicability of an enzymatic time temperature integrator as a quality indicator for mushrooms in the distribution chain. *Postharvest Biology and Technology*, 42(1), 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.05.011>
- Borchert, N. B., Cruz-Romero, M. C., Mahajan, P. V., Ren, M., Papkovsky, D. B., & Kerry, J. P. (2014). Application of gas sensing technologies for non-destructive monitoring of headspace gases (O₂ and CO₂) during chilled storage of packaged mushrooms (*Agaricus bisporus*) and their correlation with product quality parameters. *Food Packaging and Shelf Life*, 2(1), 17–29. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2014.05.001>
- Cao, Y., & Mezzenga, R. (2020). Design principles of food gels. *Nature Food*, 1(2), 106–118. <https://doi.org/10.1038/s43016-019-0009-x>
- Caprioli, F., & Quercia, L. (2014). Ethylene detection methods in post-harvest technology: A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 203, 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2014.06.109>
- Chen, H., Lin, H., Jiang, X., Lin, M., & Fan, Z. (2022). Amelioration of chilling injury and enhancement of quality maintenance in cold-stored guava fruit by melatonin treatment. *Food Chemistry: X*, 14, 100297. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100297>
- Chen, H., Zhang, M., Bhandari, B., & Guo, Z. (2018). Applicability of a colorimetric indicator label for monitoring freshness of fresh-cut green bell pepper. *Postharvest Biology and Technology*, 140, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.02.011>
- Chen, L., Pu, Y., Xu, Y., He, X., Cao, J., Ma, Y., & Jiang, W. (2022). Anti-diabetic and anti-obesity: Efficacy evaluation and exploitation of polyphenols in fruits and vegetables. *Food Research International*, 157, 111202. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111202>
- Cheng, H., Xu, H., McClements, D. J., Chen, L., Jiao, A., Tian, Y., Miao, M., & Jin, Z. (2022). Recent advances in intelligent food packaging materials: Principles, preparation and applications. *Food Chemistry*, 375, 131738. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131738>
- Choi, I., & Han, J. (2018). Development of a novel on-off type carbon dioxide indicator based on interactions between sodium caseinate and pectin. *Food Hydrocolloids*, 80, 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.01.028>
- da Silva Filipini, G., Romani, V. P., & Guimarães Martins, V. (2020). Biodegradable and active-intelligent films based on methylcellulose and jambolão (*Syzygium cumini*) skins extract for food packaging. *Food Hydrocolloids*, 109, 106139. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106139>
- Deng, Y., Liu, K., Liu, Y., Dong, H., & Li, S. (2016). A novel acetylcholinesterase biosensor based on nano-porous pseudo carbon paste electrode modified with gold nanoparticles for detection of methyl parathion. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 16(9), 9460–9467. <https://doi.org/10.1166/jnn.2016.13059>
- de Oliveira Filho, J. G., Bertolo, M. R. V., Rodrigues, M. Á. V., Marangon, C. A., da Silva, G. C., Odoni, F. C. A., & Egea, M. B. (2021). Curcumin: A multifunctional molecule for the development of smart and active biodegradable polymer-based films. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 840–849. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.11.005>
- Dirpan, A., Latief, R., Syarifuddin, A., Rahman, A. N. F., Putra, R. P., & Hidayat, S. H. (2018). The use of colour indicator as a smart packaging system for evaluating mangoes Arummanis (*Mangifera indica* L. var. Arummanisa) freshness. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 157(1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/157/1/012031>

- Eom, K.-H., Hyun, K.-H., Lin, S., & Kim, J.-W. (2014). The meat freshness monitoring system using the smart RFID tag. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 10(7), 591812. <https://doi.org/10.1155/2014/591812>
- Eom, K. H., Kim, M. C., Lee, S., & won Lee, C. (2012). The vegetable freshness monitoring system using RFID with oxygen and carbon dioxide sensor. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 8(6), 472986. <https://doi.org/10.1155/2012/472986>
- Etxabide, A., Kilmartin, P. A., & Maté, J. I. (2021). Color stability and pH-indicator ability of curcumin, anthocyanin and betanin containing colorants under different storage conditions for intelligent packaging development. *Food Control*, 121, 107645. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107645>
- FAO (2021). Fruit and vegetables — your dietary essentials. The International Year of Fruits and Vegetables, 2021, background paper. Food Agric Org Rome. <https://doi.org/10.4060/cb2395en>
- Fernandez, C. M., Alves, J., Gaspar, P. D., Lima, T. M., & Silva, P. D. (2022). Innovative processes in smart packaging. A systematic review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 11863. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11863>
- Firouz, M. S., Mohi-Alden, K., & Omid, M. (2021). A critical review on intelligent and active packaging in the food industry: Research and development. *Food Research International*, 141, 110113. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110113>
- Flórez, M., Guerra-Rodríguez, E., Cazón, P., & Vázquez, M. (2022). Chitosan for food packaging: Recent advances in active and intelligent films. *Food Hydrocolloids*, 124, 107328. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107328>
- Gao, T., Tian, Y., Zhu, Z., & Sun, D.-W. (2020). Modelling, responses and applications of time-temperature indicators (TTIs) in monitoring fresh food quality. *Trends in Food Science & Technology*, 99, 311–322. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.019>
- Ghaani, M., Cozzolino, C. A., Castelli, G., & Farris, S. (2016). An overview of the intelligent packaging technologies in the food sector. *Trends in Food Science & Technology*, 51, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.02.008>
- Guo, R., Xue, L., Jin, N., Duan, H., Li, M., & Lin, J. (2022). Power-free microfluidic biosensing of Salmonella with slide multivalve and disposable syringe. *Biosensors and Bioelectronics*, 213, 114458. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114458>
- Guo, Z., Zuo, H., Ling, H., Yu, Q., Gou, Q., & Yang, L. (2022). A novel colorimetric indicator film based on watermelon peel pectin and anthocyanins from purple cabbage for monitoring mutton freshness. *Food Chemistry*, 383, 131915. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131915>
- Han, J.-W., Ruiz-Garcia, L., Qian, J.-P., & Yang, X.-T. (2018). Food packaging: A comprehensive review and future trends. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(4), 860–877. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12343>
- Hills, K. D., Oliveira, D. A., Cavallaro, N. D., Gomes, C. L., & McLamore, E. S. (2018). Actuation of chitosan-aptamer nanobrush borders for pathogen sensing. *Analyst*, 143(7), 1650–1661. <https://doi.org/10.1039/C7AN02039B>
- Hu, B., Sun, D.-W., Pu, H., & Wei, Q. (2019). Recent advances in detecting and regulating ethylene concentrations for shelf-life extension and maturity control of fruit: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 91, 66–82. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.06.010>
- Hu, X. G., Li, X., Park, S. H., Kim, Y.-H., & Yang, S. I. (2016). Nondestructive monitoring of kiwi ripening process using colorimetric ethylene sensor. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 37(5), 759–762. <https://doi.org/10.1002/bkcs.10745>
- Iskandar, A., Yuliasih, I., & Warsiki, E. (2020). Performance improvement of fruit ripeness smart label based on ammonium molybdate color indicators. *Indonesian Food Science and Technology Journal*, 3(2), 48–57. <https://doi.org/10.22437/iftstj.v3i2.10178>
- Jafarzadeh, S., Nafchi, A. M., Salehabadi, A., Oladzad-abbasabadi, N., & Jafari, S. M. (2021). Application of bio-nanocomposite films and edible coatings for extending the shelf life of fresh fruits and vegetables. *Advances in Colloid and Interface Science*, 291, 102405. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2021.102405>
- Jiang, H., Zhang, W., Xu, Y., Zhang, Y., Pu, Y., Cao, J., & Jiang, W. (2021). Applications of plant-derived food by-products to maintain quality of postharvest fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 116, 1105–1119. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.09.010>
- Joshi, N., Rawat, K., & Bohidar, H. B. (2018). pH and ionic strength induced complex coacervation of pectin and gelatin A. *Food Hydrocolloids*, 74, 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.08.011>
- Jung, S., Cui, Y., Barnes, M., Satam, C., Zhang, S., Chowdhury, R. A., Adumbumkulath, A., Sahin, O., Miller, C., Sajadi, S. M., Sassi, L. M., Ji, Y., Bennett, M. R., Yu, M., Friguglietti, J., Merchant, F. A., Verduzco, R., Roy, S., Vajtai, R., ... Ajayan, P. M. (2020). Multifunctional bio-nanocomposite coatings for perishable fruits. *Advanced Materials*, 32(26), 1908291. <https://doi.org/10.1002/adma.201908291>
- Kaewnu, K., Samoson, K., Thiangchanya, A., Phonchai, A., & Limbut, W. (2022). A novel colorimetric indicator for ethanol detection in preserved baby mangoes. *Food Chemistry*, 369, 130769. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130769>

- Kalpana, S., Priyadarshini, S. R., Leena, M. M., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2019). Intelligent packaging: Trends and applications in food systems. *Trends in Food Science & Technology*, 93, 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.09.008>
- Kayitmazer, A. B., Seeman, D., Minsky, B. B., Dubin, P. L., & Xu, Y. (2013). Protein–polyelectrolyte interactions. *Soft Matter*, 9(9), 2553–2583. <https://doi.org/10.1039/C2SM27002A>
- Keshri, N., Truppel, I., Herppich, W. B., Geyer, M., Weltzien, C., & Mahajan, P. V. (2019). Development of sensor system for real-time measurement of respiration rate of fresh produce. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 322–328. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.006>
- Keshri, N., Truppel, I., Herppich, W. B., Geyer, M., Weltzien, C., & Mahajan, P. V. (2020). In-situ measurement of fresh produce respiration using a modular sensor-based system. *Sensors*, 20(12), 3589. <https://doi.org/10.3390/s20123589>
- Kim, Y. H., Yang, Y. J., Kim, J. S., Choi, D. S., Park, S. H., Jin, S. Y., & Park, J. S. (2018). Non-destructive monitoring of apple ripeness using an aldehyde sensitive colorimetric sensor. *Food Chemistry*, 267, 149–156. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.110>
- Kuswandi, B., Maryska, C., Jayus, Abdullah, A., & Heng, L. Y. (2013). Real time on-package freshness indicator for guavas packaging. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 7(1), 29–39. <https://doi.org/10.1007/s11694-013-9136-5>
- Kuswandi, B., & Murdyaningsih, E. A. (2017). Simple on package indicator label for monitoring of grape ripening process using colorimetric pH sensor. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(4), 2180–2194. <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9603-5>
- Lang, C., & Hübert, T. (2012). A colour ripeness indicator for apples. *Food and Bioprocess Technology*, 5(8), 3244–3249. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0694-4>
- Lee, K., Baek, S., Kim, D., & Seo, J. (2019). A freshness indicator for monitoring chicken-breast spoilage using a Tyvek® sheet and RGB color analysis. *Food Packaging and Shelf Life*, 19, 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.11.016>
- Liang, Y., Yao, Y., Liu, Y., Li, Y., Xu, C., Fu, L., & Lin, B. (2022). Curcumin-loaded HKUST-1@ carboxymethyl starch-based composites with moisture-responsive release properties and synergistic antibacterial effect for perishable fruits. *International Journal of Biological Macromolecules*, 214, 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.06.022>
- Liu, L., Wu, W., Zheng, L., Yu, J., Sun, P., & Shao, P. (2022). Intelligent packaging films incorporated with anthocyanins-loaded ovalbumin-carboxymethyl cellulose nanocomplexes for food freshness monitoring. *Food Chemistry*, 387, 132908. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132908>
- Liu, M., Zhang, J., Liu, S., & Li, B. (2022). A label-free visual aptasensor for zearalenone detection based on target-responsive aptamer-cross-linked hydrogel and color change of gold nanoparticles. *Food Chemistry*, 389, 133078. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133078>
- Liu, X., Le Bourvellec, C., Yu, J., Zhao, L., Wang, K., Tao, Y., Renard, C. M. G. C., & Hu, Z. (2022). Trends and challenges on fruit and vegetable processing: Insights into sustainable, traceable, precise, healthy, intelligent, personalized and local innovative food products. *Trends in Food Science & Technology*, 125, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.016>
- Liu, Y., Ma, Y., Feng, T., Luo, J., Sameen, D. E., Hossen, M. A., Dai, J., Li, S., & Qin, W. (2021). Development and characterization of aldehyde-sensitive cellulose/chitosan/beeswax colorimetric papers for monitoring kiwifruit maturity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 187, 566–574. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.132>
- Liu, Y., Wang, R., Wang, D., Sun, Z., Liu, F., Zhang, D., & Wang, D. (2022). Development of a food packaging antibacterial hydrogel based on gelatin, chitosan, and 3-phenyllactic acid for the shelf-life extension of chilled chicken. *Food Hydrocolloids*, 127, 107546. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107546>
- Lu, P., Liu, R., Liu, X., & Wu, M. (2018). Preparation of Self-supporting bagasse cellulose nanofibrils hydrogels induced by zinc ions. *Nanomaterials*, 8(10), 800. <https://doi.org/10.3390/nano8100800>
- Luo, X., Zaitoon, A., & Lim, L.-T. (2022). A review on colorimetric indicators for monitoring product freshness in intelligent food packaging: Indicator dyes, preparation methods, and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(3), 2489–2519. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12942>
- Ma, Q., & Wang, L. (2016). Preparation of a visual pH-sensing film based on tara gum incorporating cellulose and extracts from grape skins. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 235, 401–407. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.05.107>
- Maftoonazad, N., & Ramaswamy, H. (2019). Design and testing of an electrospun nanofiber mat as a pH biosensor and monitor the pH associated quality in fresh date fruit (*Rutab*). *Polymer Testing*, 75, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.01.011>
- Miller, K., Reichert, C. L., & Schmid, M. (2021). Biogenic amine detection systems for intelligent packaging concepts: Meat and meat products. *Food Reviews International*, 1–25. <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1961270>

- Mohammadian, E., Alizadeh-Sani, M., & Jafari, S. M. (2020). Smart monitoring of gas/temperature changes within food packaging based on natural colorants. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(6), 2885–2931. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12635>
- Mohd Ali, M., Hashim, N., & Shahamshah, M. I. (2021). Durian (*Durio zibethinus*) ripeness detection using thermal imaging with multivariate analysis. *Postharvest Biology and Technology*, 176, 111517. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111517>
- Müller, P., & Schmid, M. (2019). Intelligent packaging in the food sector: A brief overview. *Foods*, 8(1), 16. <https://doi.org/10.3390/foods8010016>
- Mutreja, R., Jariyal, M., Pathania, P., Sharma, A., Sahoo, D. K., & Suri, C. R. (2016). Novel surface antigen based impedimetric immunosensor for detection of *Salmonella typhimurium* in water and juice samples. *Biosensors and Bioelectronics*, 85, 707–713. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2016.05.079>
- Nguyen, L. H., Oveissi, F., Chandrawati, R., Dehghani, F., & Naficy, S. (2020). Naked-eye detection of ethylene using thiol-functionalized polydiacetylene-based flexible sensors. *ACS Sensors*, 5(7), 1921–1928. <https://doi.org/10.1021/acssensors.0c00117>
- Niponsak, A., Laohakunjit, N., & Kerdchoechuen, O. (2015). Contribution to volatile fingerprinting and physico-chemical qualities of minimally processed Durian cv. 'Monthong' during storage: Identification of a novel chemical ripeness marker. *Food and Bioprocess Technology*, 8(6), 1229–1243. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1486-z>
- Niponsak, A., Laohakunjit, N., Kerdchoechuen, O., & Wong-sawadee, P. (2016). Development of smart colourimetric starch-based indicator for liberated volatiles during durian ripeness. *Food Research International*, 89, 365–372. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.08.038>
- Niponsak, A., Laohakunjit, N., Kerdchoechuen, O., Wong-sawadee, P., & Uthairatanakij, A. (2020). Novel ripeness label based on starch/chitosan incorporated with pH dye for indicating eating quality of fresh-cut durian. *Food Control*, 107, 106785. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106785>
- Otoni, C. G., Azeredo, H. M. C., Mattos, B. D., Beaumont, M., Correa, D. S., & Rojas, O. J. (2021). The food-materials nexus: Next generation bioplastics and advanced materials from agri-food residues. *Advanced Materials*, 33(43), 2102520. <https://doi.org/10.1002/adma.202102520>
- Pathak, N., Caleb, O. J., Rauh, C., & Mahajan, P. V. (2017). Effect of process variables on ethylene removal by vacuum ultraviolet radiation: Application in fresh produce storage. *Biosystems Engineering*, 159, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.04.008>
- Pereira, V. A., de Arruda, I. N. Q., & Stefani, R. (2015). Active chitosan/PVA films with anthocyanins from *Brassica oleraceae* (red cabbage) as time-temperature indicators for application in intelligent food packaging. *Food Hydrocolloids*, 43, 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.05.014>
- Perumal, A. B., Huang, L., Nambiar, R. B., He, Y., Li, X., & Selamuthu, P. S. (2022). Application of essential oils in packaging films for the preservation of fruits and vegetables: A review. *Food Chemistry*, 375, 131810. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131810>
- Pirsa, S. (2021). Nanocomposite base on carboxymethylcellulose hydrogel: Simultaneous absorbent of ethylene and humidity to increase the shelf life of banana fruit. *International Journal of Biological Macromolecules*, 193, 300–310. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.10.075>
- Pirsa, S., & Chavoshizadeh, S. (2018). Design of an optical sensor for ethylene based on nanofiber bacterial cellulose film and its application for determination of banana storage time. *Polymers for Advanced Technologies*, 29(5), 1385–1393. <https://doi.org/10.1002/pat.4250>
- Pirsa, S., Sani, I. K., & Mirtalebi, S. S. (2022). Nano-biocomposite based color sensors: Investigation of structure, function, and applications in intelligent food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 31, 100789. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100789>
- Qi, W., Wang, H., Zhou, Z., Yang, P., Wu, W., Li, Z., & Li, X. (2020). Ethylene emission as a potential indicator of Fuji apple flavor quality evaluation under low temperature. *Horticultural Plant Journal*, 6(4), 231–239. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2020.03.007>
- Qin, Y., Liu, Y., Yong, H., Liu, J., Zhang, X., & Liu, J. (2019). Preparation and characterization of active and intelligent packaging films based on cassava starch and anthocyanins from *Lycium ruthenicum* Murr. *International Journal of Biological Macromolecules*, 134, 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.029>
- Rahman, A. T. M. M., Kim, D. H., Jang, H. D., Yang, J. H., & Lee, S. J. (2018). Preliminary study on biosensor-type time-temperature integrator for intelligent food packaging. *Sensors*, 18(6), 1949. <https://doi.org/10.3390/s18061949>
- Shao, P., Liu, L., Yu, J., Lin, Y., Gao, H., Chen, H., & Sun, P. (2021). An overview of intelligent freshness indicator packaging for food quality and safety monitoring. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.10.012>
- Shao, P., Liu, L., Yu, J., Zheng, L., & Sun, P. (2022). Novel aldehyde sensitive bio-based colorimetric film for kiwi fruit freshness monitoring. *LWT*, 159, 113177. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113177>

- Shu, C., Zhang, W., Zhao, H., Cao, J., & Jiang, W. (2020). Chlorogenic acid treatment alleviates the adverse physiological responses of vibration injury in apple fruit through the regulation of energy metabolism. *Postharvest Biology and Technology*, 159, 110997. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.110997>
- Sohail, M., Sun, D.-W., & Zhu, Z. (2018). Recent developments in intelligent packaging for enhancing food quality and safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(15), 2650–2662. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1449731>
- Tang, Q., Shi, X., Hou, X., Zhou, J., & Xu, Z. (2014). Development of molecularly imprinted electrochemical sensors based on Fe₃O₄@MWNT-COOH/CS nanocomposite layers for detecting traces of acephate and trichlorfon. *Analyst*, 139(24), 6406–6413. <https://doi.org/10.1039/C4AN01514B>
- Tarone, A. G., Cazarin, C. B. B., & Junior, M. R. M. (2020). Anthocyanins: New techniques and challenges in microencapsulation. *Food Research International*, 133, 109092. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109092>
- Umapathi, R., Ghoreishian, S. M., Sonwal, S., Rani, G. M., & Huh, Y. S. (2022). Portable electrochemical sensing methodologies for on-site detection of pesticide residues in fruits and vegetables. *Coordination Chemistry Reviews*, 453, 214305. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.214305>
- Valente, J., Almeida, R., & Kooistra, L. (2019). A comprehensive study of the potential application of flying ethylene-sensitive sensors for ripeness detection in apple orchards. *Sensors*, 19(2), 372. <https://doi.org/10.3390/s19020372>
- Vanderroost, M., Ragaert, P., Devlieghere, F., & De Meulenaer, B. (2014). Intelligent food packaging: The next generation. *Trends in Food Science & Technology*, 39(1), 47–62. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.06.009>
- Wallace, T. C., Bailey, R. L., Blumberg, J. B., Burton-Freeman, B., Chen, C. O., Crowe-White, K. M., Drewnowski, A., Hooshmand, S., Johnson, E., Lewis, R., Murray, R., Shapses, S. A., & Wang, D. D. (2020). Fruits, vegetables, and health: A comprehensive narrative, umbrella review of the science and recommendations for enhanced public policy to improve intake. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(13), 2174–2211. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1632258>
- Wang, J., Li, D., Ye, Y., Qiu, Y., Liu, J., Huang, L., Liang, B., & Chen, B. (2021). A fluorescent metal-organic framework for food real-time visual monitoring. *Advanced Materials*, 33(15), 2008020. <https://doi.org/10.1002/adma.202008020>
- Warsiki, E., & Rofifah, N. (2018). Dragon fruit freshness detector based on methyl red colour indicator. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 209, 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/209/1/012016>
- Yang, J., & Xu, Y. (2021). Prediction of fruit quality based on the RGB values of time-temperature indicator. *Journal of Food Science*, 86(3), 932–941. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15518>
- Yao, Y., Deng, Y., Liang, Y., Li, X., Tang, X., Lin, M., Xu, C., Fu, L., & Lin, B. (2022). Convenient, nondestructive monitoring and sustained-release of ethephon/chitosan film for on-demand of fruit ripening. *International Journal of Biological Macromolecules*, 214, 338–347. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.06.086>
- Yong, H., & Liu, J. (2020). Recent advances in the preparation, physical and functional properties, and applications of anthocyanins-based active and intelligent packaging films. *Food Packaging and Shelf Life*, 26, 100550. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100550>
- Yue, X. Q., Shang, Z. Y., Yang, J. Y., Huang, L., & Wang, Y. Q. (2020). A smart data-driven rapid method to recognize the strawberry maturity. *Information Processing in Agriculture*, 7(4), 575–584. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.10.005>
- Zhang, D., & Chen, L. (2021). Design and research of intelligent interaction in fresh fruit and vegetable packaging. *Packaging Engineering*, 42(4), 202–209. <https://doi.org/10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.04.029>
- Zhang, W., Jiang, H., Zhang, Y., Cao, J., & Jiang, W. (2021). Synergistic effects of 1-MCP and hot air treatments on delaying softening and promoting anthocyanin biosynthesis in nectarines. *Postharvest Biology and Technology*, 180, 111598. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111598>
- Zhang, W., Li, X., & Jiang, W. (2020). Development of antioxidant chitosan film with banana peels extract and its application as coating in maintaining the storage quality of apple. *International Journal of Biological Macromolecules*, 154, 1205–1214. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.275>
- Zhang, W., Shu, C., Chen, Q., Cao, J., & Jiang, W. (2019). The multi-layer film system improved the release and retention properties of cinnamon essential oil and its application as coating in inhibition to *penicillium* expansion of apple fruit. *Food Chemistry*, 299, 125109. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125109>
- Zhang, W., Zhao, H., Jiang, H., Xu, Y., Cao, J., & Jiang, W. (2020). Multiple 1-MCP treatment more effectively alleviated postharvest nectarine chilling injury than conventional one-time 1-MCP treatment by regulating ROS and energy metabolism. *Food Chemistry*, 330, 127256. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127256>
- Zhang, W., Zhao, H., Zhang, J., Sheng, Z., Cao, J., & Jiang, W. (2019). Different molecular weights chitosan coatings

- delay the senescence of postharvest nectarine fruit in relation to changes of redox state and respiratory pathway metabolism. *Food Chemistry*, 289, 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.047>
- Zhang, X., Guo, M., Ismail, B. B., He, Q., Jin, T. Z., & Liu, D. (2021). Informative and corrective responsive packaging: Advances in farm-to-fork monitoring and remediation of food quality and safety. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 20(5), 5258–5282. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12807>
- Zhang, Y., Li, H., Yao, Y., Shen, X., Xu, C., Fu, L., & Lin, B. (2022). Multifunctional flexible Ag-MOFs@CMFP composite paper for fruit preservation and real-time wireless monitoring of fruit quality during storage and transportation. *Food Chemistry*, 395, 133614. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133614>
- Zhao, M., Wang, P., Guo, Y., Wang, L., Luo, F., Qiu, B., Guo, L., Su, X., Lin, Z., & Chen, G. (2018). Detection of aflatoxin B1 in food samples based on target-responsive aptamer-cross-linked hydrogel using a handheld pH meter as readout. *Talanta*, 176, 34–39. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.08.006>
- Zheng, L., Liu, L., Yu, J., & Shao, P. (2022). Novel trends and applications of natural pH-responsive indicator film in food packaging for improved quality monitoring. *Food Control*, 134, 108769. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108769>
- Zhou, W., Wu, Z., Xie, F., Tang, S., Fang, J., & Wang, X. (2021). 3D printed nanocellulose-based label for fruit freshness keeping and visual monitoring. *Carbohydrate Polymers*, 273, 118545. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118545>
- Zhu, X., Li, Q., Li, J., Luo, J., Chen, W., & Li, X. (2018). Comparative study of volatile compounds in the fruit of two banana cultivars at different ripening stages. *Molecules*, 23(10), 2456. <https://doi.org/10.3390/molecules23102456>