

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 664.8



CC BY 4.0

**УСТОЙЧИВАЯ УПАКОВКА ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ.
НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ
БИОРАЗЛАГАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ, УМНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И РОЛЬ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

Бурак Л. Ч. ORCID ID 0000-0002-6613-439X

*Общество с ограниченной ответственностью «Белросаква», Минск,
Республика Беларусь, e-mail: leonidburak@gmail.com*

Традиционные одноразовые пластиковые изделия создают экологические проблемы, включая накопление отходов и истощение ресурсов. Научное сообщество активно ищет альтернативы, которые обеспечивают баланс между функциональностью, стоимостью и экологической устойчивостью. Цель исследования заключается в анализе последних достижений в области устойчивой упаковки продуктов питания, с акцентом на биоразлагаемые, компостируемые и перерабатываемые материалы, а также интеграцию активных и интеллектуальных упаковочных систем. В работе использованы научные публикации на русском и английском языках, изданные в период с 2020 по 2025 г. Зарубежные исследования были подобраны через базы данных Scopus, PubMed и Web of Science, в то время как русскоязычные материалы были отобраны из РИНЦ на основе релевантных ключевых запросов. Выбранные источники были структурированы, подвергнуты критической оценке и обобщены. Анализ результатов научных исследований показал, что устойчивая упаковка продуктов питания приобретает все большее значение на фоне растущего внимания к экологическим проблемам, пищевым отходам и безопасности. Хотя традиционная пластиковая упаковка долгое время оставалась эффективной, она значительно способствует загрязнению окружающей среды и зависит от невозобновляемых ресурсов. Обзор освещает инновации в материалах, таких как биополимеры, пленки на основе целлюлозы, покрытия из водорослей и наноматериалы, предлагая экологически чистые альтернативы, которые сохраняют основные функции упаковки. Активные и интеллектуальные упаковочные технологии улучшают сохранность продуктов благодаря антимикробным и антиоксидантным агентам, а также позволяют осуществлять мониторинг свежести в реальном времени с помощью встроенных датчиков. Технологии искусственного интеллекта, включая машинное обучение, способствуют оптимизации выбора материалов, прогнозированию срока хранения и контролю качества через анализ данных. Синергия между экологически чистыми материалами и цифровыми технологиями трансформирует сферу упаковки пищевых продуктов, предлагая перспективный путь к снижению воздействия на окружающую среду, повышению безопасности пищевых продуктов и улучшению операционной эффективности на протяжении всей цепочки поставок.

Ключевые слова: упаковка, биоразлагаемые материалы, активные упаковочные системы, безопасность, пищевые отходы, биополимеры, наноматериалы, искусственный интеллект

**SUSTAINABLE FOOD PACKAGING.
NEW DEVELOPMENTS IN THE FIELD OF BIODEGRADABLE
MATERIALS, SMART TECHNOLOGIES
AND THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE**

Burak L. Ch. ORCID ID 0000-0002-6613-439X

*Limited Liability Company “Belrosakva”, Minsk, Republic of Belarus,
e-mail: leonidburak@gmail.com*

Traditional single-use plastic products create environmental problems, including waste accumulation and resource depletion. The scientific community is actively seeking alternatives that balance functionality, cost, and sustainability. The purpose of this study is to review recent advances in sustainable food packaging, with a focus on biodegradable, compostable and recyclable materials, and the integration of active and intelligent packaging systems. The work uses scientific publications in Russian and English, published in the period from 2015 to 2025. Foreign studies were selected through the Scopus, PubMed and Web of Science databases, while Russian-language materials were selected from the RSCI based on relevant key queries. The selected sources were structured, critically appraised and synthesized. An analysis of research findings showed that sustainable food packaging is becoming increasingly important amid growing attention to environmental issues, food waste and safety. Although traditional plastic packaging has long remained effective, it contributes significantly to environmental pollution and relies on non-renewable resources. The review highlights innovations in materials such as biopolymers, cellulose-based films, algae coatings and nanomaterials, offering environmentally friendly alternatives that retain the core functions of packaging. Active and intelligent packaging technologies improve food preservation through antimicrobial and antioxidant agents and enable real-time freshness monitoring using built-in sensors. Artificial intelligence technologies, including machine learning, help optimize material selection, predict shelf life and quality control through data analysis. Ultimately, the synergy between sustainable materials and digital technologies is transforming the food packaging industry, offering a promising path to reducing environmental impact, improving food safety and improving operational efficiency throughout the supply chain.

Keywords: packaging, biodegradable materials, active packaging systems, safety, food waste, biopolymers, nanomaterials, artificial intelligence

Введение

Глобальный спрос на экологически безопасную упаковку для пищевых продуктов растет на фоне экологических рисков, связанных с одноразовыми пластиками, и повышения осведомленности потребителей о загрязнении окружающей среды [1, 2]. В ответ на это промышленность и научное сообщество развивают альтернативные решения, которые должны одновременно обеспечивать барьерную защиту, безопасность пищевых продуктов, технологичность производства и приемлемую стоимость, не увеличивая экологическую нагрузку [3]. Под устойчивой упаковкой обычно понимают материалы и технологические подходы, снижающие образование отходов, углеродный след и повышающие пригодность к переработке или биоразложению [4, 5]. Наиболее быстро развиваются направления биоразлагаемых и компостируемых полимеров (например, PLA и PHA), съедобных покрытий, целлюлозных и комбинированных барьерных материалов [6–8]. Существенный вклад в повышение функциональности упаковки вносит наномодификация (нанонаполнители, наночастицы металлов/оксидов, наноцеллюлоза), позволяющая улучшать механические характеристики, газо- и влагобарьер, УФ-защиту, а также антимикробные свойства [9–11]. Одновременно усиливается тренд на развитие аналитических и сенсорных решений для контроля качества и безопасности пищевых продуктов в реальном времени (в том числе спектроскопические и сенсорные платформы) [12–14]. Отдельный пласт инноваций – активная и интеллектуальная упаковка. Активные решения направлены на изменение среды внутри упаковки (например, поглощение кислорода/влаги, контролируемый выпуск антиоксидантов/антимикробных веществ) и тем самым продлевают срок годности [15, 16]. Интеллектуальная упаковка, напротив, в основном не меняет продукт, но информирует о его состоянии: используются индикаторы температуры-времени (TTI), pH/газочувствительные метки, колориметрические датчики, RFID/NFC и цифровые каналы считывания [17–19]. В длинных цепях поставок, где критичны колебания температуры и времени транспортировки, такие решения особенно значимы для сокращения пищевых потерь [20]. На этом фоне искусственный интеллект (ИИ) становится ключевым интегрирующим инструментом: он применяется для оптимизации конструкций упаковки, прогнозирования порчи/срока годности, обработки сигналов сенсоров, компьютерного зрения

на линиях контроля качества и логистической аналитики [21–23]. Несмотря на рост числа обзоров, сохраняются ограничения: часто рассматриваются отдельные группы материалов или технологий без системной увязки «материал → функция → риски → утилизация», а также недостаточно полно обсуждаются вопросы промышленной масштабируемости, нормативного регулирования и данных, необходимых для эффективного внедрения ИИ [3, 11, 24].

Цель исследования – анализ последних достижений в области устойчивой упаковки продуктов питания, с акцентом на биоразлагаемые, компостируемые и перерабатываемые материалы, а также интеграцию активных и интеллектуальных упаковочных систем.

Материалы и методы исследования

Обзор выполнен на основе публикаций 2020–2025 гг. на русском и английском языках. Поиск проводился по ключевым словам, объединяющим тематику устойчивой упаковки, биополимеров (PLA, PHA, крахмал, целлюлоза, хитозан), наноматериалов (AgNPs, ZnO, TiO₂, CuO, наноцеллюлоза), активной/интеллектуальной упаковки (oxygen scavenger, TTI, freshness indicator, pH sensor, RFID/NFC), а также ИИ/ML (shelf-life prediction, machine learning, computer vision, supply chain, migration prediction). В процессе отбора научных публикаций приоритет отдавали экспериментальным и обзорным научно значимым исследованиям последних лет, которые обладали явными практическими метриками (барьерные/механические свойства, антимикробный эффект, точность ML-моделей).

Результаты исследования и их обсуждение

1. Инновации в материалах устойчивой упаковки

Биополимеры (полисахариды, белки, полимеры микробного происхождения) формируют основу «зеленой» замены нефтехимическим пластикам. Преимущества биополимеров – возобновляемое сырье, потенциальная биоразлагаемость/компостируемость, возможность модификации состава и структуры под задачу [5, 6, 8]. PLA остается наиболее коммерчески доступным биополимером: он технологичен, пригоден для термоформования и промышленного компостирования, но исходно характеризуется хрупкостью и ограниченной термостойкостью, из-за чего требует пластификации, наполнителей или сополимеризации [7, 25]. PHA перспективны благодаря био-

разложению в различных средах, однако пока ограничены высокой стоимостью производства и вариабельностью свойств [8, 26]. Материалы на основе крахмала привлекают доступностью, но имеют слабые влагобарьерные характеристики и требуют композитирования/модификации для практической упаковки [6]. Белково-полисахаридные системы и съедобные покрытия часто дают хорошие кислородные барьеры, но критически зависят от влажности и нуждаются в структурном усилении [27]. Полисахариды морских водорослей (например, альгинат), хитозан и желатин широко рассматриваются как основа съедобных/биоразлагаемых пленок и покрытий, включая варианты с биоактивностью [28, 29]. Для морских биополимеров типичны проблемы воспроизводимости сырья, влагочувствительности и логистики поставок биомассы [28]. Тем не менее показаны прикладные эффекты, включая сохранение качества рыбы/морепродуктов при низких температурах при использовании активных пленок [29]. Существенная часть экологического эффекта упаковки определяется не только материалом, но и инфраструктурой обращения с отходами [30]. Развитие технологий переработки ПЕТ и использование переработанных волокон/картона позволяют снижать потребление первичного сырья и энергоемкость жизненного цикла [31, 32]. Одновременно растет интерес к возобновляемым биоматериалам из отходов агропроизводства (например, на основе багассы) как к масштабируемым низкоуглеродным решениям [33, 34]. Однако даже «зеленые» материалы могут терять экологическое преимущество при несоответствии реальным

сценариям утилизации (смешанные потоки, загрязнение, отсутствие компостных мощностей). Поэтому при проектировании важно учитывать «end-of-life» уже на этапе выбора структуры и добавок [35, 36].

Наноматериалы и наноармирование: функциональность и риски

Наноармирование (наноцеллюлоза, наноглины, оксиды металлов, наночастицы Ag, ZnO, TiO₂, CuO, MOF-наполнители) повышает барьерные и механические свойства, а также позволяет вводить антимикробные и сенсорные функции [9–11]. Например, нанокомпозиты с AgNPs демонстрируют выраженную антимикробную активность и улучшение барьерных характеристик, но критически важны вопросы миграции и токсикологической оценки [10, 12, 37]. ZnO-наночастицы часто рассматриваются как многофункциональная добавка (антимикробность, УФ-защита), однако стабильность систем с эфирными маслами и промышленная воспроизводимость требуют дополнительной отработки [38–40]. TiO₂ может обеспечивать антимикробный эффект и УФ-защиту, но существуют риски фотокаталитической деградации матрицы и необходимость строгого контроля миграции/дозировок [41–43]. Для CuO-платформ характерны сильные антимикробные свойства, но сохраняются вопросы долгосрочной безопасности и нормативного одобрения [44, 45]. В целом применение наноматериалов усиливает функциональность упаковки, но одновременно они повышают требования к стандартизации испытаний, оценке миграции и экологическим сценариям деградации/утилизации [11, 46].

Таблица 1

Эффективность и ограничения использования наноматериалов в упаковке для пищевых продуктов

Нанокомпозит	Эффективность	Примеры использования	Ограничения и риски	Источник
AgNPs	Антимикробность, УФ-защита, барьер	Пленки для свежих фруктов/ягод	Миграция Ag, требования регулятора	[37,10]
ZnO NPs	Антимикробность, антиоксидантность, УФ-защита	Активные пленки с EO	Летучесть EO, масштабирование, переработка	[38], [39,40]
TiO ₂ NPs	УФ-защита, антимикробность	Покрытия/композиты на биополимерах	Фотокаталитическая деградация, миграция	[41–43]
CuO NPs	Сильная антимикробность	Пленки для овощей/мяса	Токсикология, стандарты безопасности	[44, 45]
Наноцеллюлоза	Усиление прочности, газобарьер	Барьерные покрытия для бумаги/пленок	Гидрофильность, стоимость обработки	[47, 48]
MOF-наполнители	Сенсорика/стабилизация красителей	Индикаторы свежести	Стоимость, миграция металлов	[49]

Примечание: составлена автором по результатам анализа опубликованных научных исследований.

Таблица 2

Материалы устойчивой упаковки: преимущества, ограничения и внедрение

Материалы	Преимущества	Ограничения	Целевое использование	Источник
PLA и модифицированные PLA-системы	Технологичность, компостируемость	Хрупкость, влагобарьер	Контейнеры, пленки сухих продуктов	[7, 25]
РНА	Биоразложение в разных средах	Стоимость, вариабельность	Премиальные упаковки, специальные решения	[8, 26]
Крахмал/полисахариды	Доступность, биоразложение	Влагочувствительность	Покрытия, комбинированные пленки	[6, 27]
Морские биополимеры	Биоактивность, съедобность	Сырье/влага/стандартизация	Рыба/морепродукты, покрытия	[28, 29]
Целлюлоза/наноцеллюлоза	Прочность, кислородный барьер	Требует влагозащиты	Бумажная упаковка, покрытия	[47, 48]
Нанокompозиты (Ag/ZnO/TiO ₂ /CuO и др.)	Барьер + антимикробность/сенсорика	Риски миграции, регулирование	Активная/интеллектуальная упаковка	[11, 46]

Примечание: составлена автором по результатам анализа опубликованных научных исследований.

В табл. 1 представлен краткий анализ преимуществ и ограничений использования наноматериалов в упаковке.

Для практического внедрения важны не только лабораторные характеристики, но и масштабируемость, совместимость с оборудованием, стоимость и возможность эффективной утилизации. PLA хорошо масштабируется, но нуждается в модификации для «влажных» применений; РНА перспективны, но дороже; целлюлозные барьерные решения сильны в кислородном барьере (в сухих условиях), но требуют влагозащитных слоев; водорослевые пленки многообещающи, но чувствительны к влажности и ограничены по промышленной переработке [6, 28, 47]. Нанокompозиты дают высокую функциональность, но усложняют нормативное одобрение и end-of-life сценарии [11, 46]. В табл. 2 обобщены преимущества и ограничения материалов устойчивой упаковки для пищевых продуктов.

2. Активная и интеллектуальная упаковка

Активная упаковка обеспечивает продление срока годности за счет управления газовой и влаговой средой, а также за счет встроенных антимикробных/антиоксидантных компонентов [15, 16]. Наиболее распространенные направления: поглотители кислорода (встроенные системы вместо пакетиков); влагопоглотители и регуляторы влажности; контролируемый выпуск активных веществ (например, эфирных масел, фенольных соединений); комбинирование с MAP (modified atmosphere packaging) [16, 50]. Ключевые практические проблемы: зависимость эффективности от температуры/влажности, стабильность активных

компонентов, доказательство безопасности при миграции, а также удобство для промышленной линии (рулонные процессы, ламинация, печать). Интеллектуальная упаковка ориентирована на мониторинг качества в реальном времени. Системы включают: ТТИ (time-temperature indicators), фиксирующие тепловую историю продукта [18]; рН/газочувствительные колориметрические пленки и метки для мяса/рыбы (летучие амины, CO₂ и др.) [19, 49]; смартфон-ориентированное считывание и интеграция с цифровыми каналами (QR/NFC), повышающие практическую пригодность [22]. Главные барьеры – долговременная стабильность (дрейф, выцветание), повторяемость сигнала в разных условиях освещения и поведения пользователя, а также стоимость массового внедрения [18, 22]. В табл. 3 представлен краткий анализ эффективности активной и интеллектуальной упаковки.

3. Роль искусственного интеллекта в упаковке

ИИ используется для ускорения разработки упаковки: от анализа свойств материалов и конструкций до поддержки инженерных решений по прочности/барьеру и оптимизации дизайна [21, 23]. Дополнительно активно обсуждаются генеративные подходы и моделирование сложных связей «состав – структура – свойство», однако практическая ценность определяется качеством датасетов и сопоставимостью экспериментальных протоколов [23]. Наиболее прикладное направление – прогнозирование свежести/срока годности по данным сенсоров (электронный нос, колориметрические массивы, спектральные методы).

Таблица 3

Краткий анализ эффективности активной и интеллектуальной упаковки

Подсистема	Принцип	Эффективность	Ограничения внедрения	Источники
Поглотители O ₂ /регуляторы влаги	Химическое/ сорбционное связывание	Окислительная стабильность, обеспечение микробиологической стабильности	Зависимость от RH/T, упаковочный дизайн	[16]
MAP + активные элементы	Газовый состав + активные слои	Цвет/микробиология мясных продуктов	Требует контроля холодной цепи	[50]
ТТИ	Необратимая кинетика реакции	Контроль тепловых процессов	Калибровка, стабильность	[18]
pH/газо-индикаторы	Ответ на летучие амины/кислоты	Возможность проведения оперативного визуального контроля свежести	Стабильность красителей, регуляторика	[19]
Смартфон + ML для считывания	Нормализация цвета/освещения	Повышение точности интерпретации	Разные камеры/ условия	[22]

Примечание: составлена автором по результатам анализа опубликованных научных исследований.

Таблица 4

ИИ в прогнозировании качества: типовые схемы

Данные	Модели	Прогнозируемые данные	Существующие риски	Источник
Электронный нос (VOC)	SVM/RF/регрессия	Порча мяса/рыбы	Доменные сдвиги, калибровка	[23]
Колориметрические метки	ML/анализ изображений	Свежесть по цвету	Освещение/камера/пользователь	[22]
Спектральные методы	CNN/регрессия	Дефекты/состав/качество	Высокая стоимость и интеграция в линию	[14]

Примечание: составлена автором по результатам анализа опубликованных научных исследований.

Показано, что модели (SVM, Random Forest, глубокие сети) способны давать высокую точность классификации порчи и/или регрессионного прогноза для ряда продуктов [22, 23]. Однако переносимость моделей между производствами ограничена изменчивостью сырья, режимов хранения и «дрейфом» сенсоров, что требует калибровки и процедур валидации. В табл. 4 представлены типовые схемы ИИ в прогнозировании качества.

ИИ активно применяется в компьютерном зрении и предиктивном обслуживании оборудования, что снижает дефекты, повышает скорость контроля и уменьшает отходы. Эти решения особенно актуальны при переходе на биополимерные пленки, где стабильность процесса может быть ниже, чем у традиционных пластиков. Параллельно развивается направление прогнозирования миграции веществ из упаковки в пищу на основе ML, что потенциально ускоряет оценку соответствия нормативам при наличии качественных данных [35].

4. Экологические и социально-экономические аспекты

Экономическая эффективность устойчивой упаковки определяется не только ценой материала, но и влиянием на потери пищи, логистику, управление отходами и риски несоответствия требованиям [26, 36]. Анализ жизненного цикла (LCA) показывает, что экологический эффект может существенно меняться в зависимости от сценария конца жизненного цикла (переработка, компостирование, сжигание, захоронение) и инфраструктуры региона [24, 34]. Важная проблема: биоразлагаемость не равна реальной утилизации, если отсутствуют условия промышленного компостирования или корректная сортировка [34, 35]. Для нанокompозитов и интеллектуальных решений дополнительно возрастает значимость оценки экотоксичности и сценариев высвобождения наночастиц/компонентов в окружающую среду [46]. Социальная составляющая включает доверие потребите-

лей к «умным» меткам и цифровому мониторингу, понимание маркировки сроков годности и готовность оплачивать более дорогую, но функциональную упаковку [36].

Проблемы и перспективы

Разработка экологически устойчивой упаковки для пищевых продуктов демонстрирует заметный прогресс, однако ее переход от экспериментальных решений к массовому применению по-прежнему ограничен совокупностью методических, технологических, экономических и регуляторных факторов. Ниже кратко обобщены ключевые проблемы и направления дальнейших исследований, которые определяют траекторию развития упаковки следующего поколения:

– К числу наиболее существенных препятствий относится отсутствие стандартизированных протоколов испытаний. Разные работы используют несопоставимые методики оценки механической прочности, газо- и влагобарьерных свойств, антимикробной эффективности и сенсорного влияния на продукт, что затрудняет сравнение результатов, воспроизводимость и регуляторное одобрение. Следовательно, первоочередной задачей становится разработка единых метрик и воспроизводимых процедур валидации, включая межлабораторные сравнения и согласованные критерии приемлемости.

– Параллельно возрастает интерес к биополимерам, модифицированным наночастицами, поскольку такие добавки способны улучшать функциональные характеристики упаковки. Встраивание ZnO, Cu, восстановленного оксида графена и TiO₂ может повышать прочность, термо- и водостойкость, УФ-защиту и антимикробную активность, а также улучшать барьерные свойства, что напрямую связано с продлением срока годности продукта. Однако эти преимущества сопровождаются научной неопределенностью: наночастицы могут по-разному влиять на биоразложение. Например, антимикробный эффект ZnO способен замедлять микробную деградацию, тогда как хитозан и TiO₂ могут как ускорять, так и замедлять разложение в зависимости от совместимости с полимерной матрицей и структуры композита. Поэтому перспективные исследования должны не только демонстрировать улучшение свойств, но и объяснять механизмы деградации и их зависимость от состава и условий эксплуатации.

– Отдельного внимания требует безопасность. Некоторые наноматериалы (в частности, медь при высоких дозировках)

потенциально проявляют цитотоксичность, что делает необходимыми систематические токсикологические исследования, оценку миграции компонентов в пищевой продукт и обоснование допустимых уровней введения. При этом важна не только безопасность для потребителя, но и экологическая «судьба» таких материалов: существует риск, что в ходе деградации полимерные матрицы будут фрагментироваться до микро- и нанопластика, а присутствие неорганических наночастиц может изменять кинетику фрагментации и профиль токсичности продуктов распада. Следовательно, требуется развитие подходов к оценке экологических рисков, включая сценарии накопления в среде и трофической передачи.

– Наряду с научными вопросами значимыми барьерами остаются стоимость и масштабируемость. Высокая себестоимость, ограниченные цепочки поставок и фрагментация рынка тормозят коммерциализацию даже при доказанных преимуществах материалов. В этой связи перспективны исследования, ориентированные на снижение затрат (оптимизация рецептур и технологий), обеспечение стабильного сырьевого снабжения и анализ успешных примеров масштабирования от лаборатории к промышленному производству.

– Существенное влияние оказывают регуляторные ограничения: получение разрешений особенно сложно для новых композитов, биоразлагаемых добавок, а также активных и сенсорных систем. Ускорению внедрения могли бы способствовать прозрачные требования к маркировке, согласование международных подходов и наличие стандартизированных пакетов доказательств безопасности.

– Наконец, важным условием практического эффекта является принятие потребителями. Даже экологически предпочтительные решения могут не работать без доверия к материалам, понимания правил утилизации и готовности платить. Поэтому востребованы междисциплинарные исследования, связывающие свойства упаковки, коммуникацию и реальные поведенческие сценарии.

Перспективным направлением выступает интеграция сенсоров, анализа данных и искусственного интеллекта. ИИ может использоваться для прогнозирования деградации материалов и срока годности, оптимизации дизайна упаковки и мониторинга качества в цепочке поставок в реальном времени. Однако для этого необходимы репрезентативные наборы данных, стандартизированная калибровка и сопоставимость измерений, а также защищенные механизмы обмена данными и проверяемые моде-

ли. В более широком контексте будущие решения должны сочетать высокие эксплуатационные свойства с биоразлагаемостью и принципами циркулярной экономики, включая проектирование под переработку, замкнутые циклы и апсайклинг. Реализация этих задач возможна только при устойчивом межсекторном взаимодействии науки, промышленности и регулирующих органов.

Заключение

Современная пищевая упаковка все чаще развивается как интегрированная система, где материал обеспечивает базовую защиту, активные элементы продлевают срок годности, интеллектуальные индикаторы информируют о состоянии продукта, а ИИ связывает данные сенсоров, логистики и производства в единый контур принятия решений. Наиболее перспективным направлением выглядит конвергенция: биополимерные/целлюлозные основы с инженерной влагозащитой; выборочное наноармирование (при строгой оценке миграции и end-of-life); массово масштабируемые индикаторы (ТТІ, рН/газовые метки) с цифровым считыванием; ML-модели с валидацией в реальных цепях поставок и процедурами калибровки. Главные препятствия для широкого промышленного внедрения – высокая стоимость, масштабируемость, регуляторика, стандартизация испытаний, а также соответствие реальным сценариям утилизации. Практический прогресс требует согласования материаловедения, пищевой инженерии, цифровых технологий и политики обращения с отходами.

Список литературы

1. Najahi H., Banni M., Nakad M. et al. Plastic Pollution in Food Packaging Systems: Impact on Human Health, Socio-economic Considerations and Regulatory Framework // *Journal of Hazardous Materials Advances*. 2025. Vol. 18. P. 100667. DOI: 10.1016/j.hazadv.2025.100667.
2. Бурак Л. Ч., Ермошина Т. В., Саманкова Н. В. Достижение устойчивого развития за счет использования новых технологий переработки пищевых продуктов // *Фундаментальные исследования*. 2024. № 10. С. 171–179. DOI: 10.17513/fr.43705.
3. Arshad M. T., Hassan S., Shehzadi R. et al. Emerging Trends in Sustainable Packaging of Food Products: An Updated Review // *Journal of Natural Fibers*. 2025. Vol. 22 (1). P. 2505608. DOI: 10.1080/17518253.2025.2535392.
4. Hussain S., Akhter R., Maktedar S. S. Advancements in Sustainable Food Packaging: From Eco-Friendly Materials to Innovative Technologies // *Sustainable Food Technology*. 2024. Vol. 2. P. 1297–1364. DOI: 10.1039/D4FB00084F.
5. Jahangiri F., Mohanty A. K., Misra M. Sustainable Biodegradable Coatings for Food Packaging: Challenges and Opportunities // *Green Chemistry*. 2024. Vol. 26. P. 4934–4974. DOI: 10.1039/D3GC02647G.
6. Fatima S., Khan M. R., Ahmad I., Sadiq M. B. Recent Advances in Modified Starch Based Biodegradable Food

- Packaging: A Review // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. P. e27453. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e27453.
7. Swetha T. A., Bora A., Mohanrasu K. et al. A Comprehensive Review on Polylactic Acid (PLA)–Synthesis, Processing and Application in Food Packaging // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023. Vol. 234. P. 123715. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123715.
8. Kusuma H. S., Sabita A., Putri N. A. et al. Waste to Wealth: Polyhydroxyalkanoates (PHA) Production From Food Waste for a Sustainable Packaging Paradigm // *Food Chemistry: Molecular Sciences*. 2024. Vol. 9. P. 100225. DOI: 10.1016/j.fochms.2024.100225.
9. Ghosh S., Mandal R. K., Mukherjee A., Roy S. Nanotechnology in the Manufacturing of Sustainable Food Packaging: A Review // *Discover Nano*. 2025. Vol. 20. P. 36. DOI: 10.1186/s11671-025-04213-x.
10. Mortazavi Moghadam F. S., Rasouli S., Mortazavi Moghadam F. A. In Vivo Study and Cytotoxicity of Migrated Silver Nanoparticles (AgNPs) From Cellulose/LDPE/AgNP Nanocomposite in Highly Perishable Food (Fish Fillet) Packaging // *ACS Food Science & Technology*. 2025. Vol. 5. P. 1024–1041. DOI: 10.1021/acsfoodscitech.4c00850.
11. Banerjee R., Bandyopadhyay J., Ray S. S. Functional Polymers and Their Nanocomposites for Sustainable Packaging Applications // *Macromolecular Materials and Engineering*. 2025. Vol. 310. P. e00130. DOI: 10.1002/mame.202500130.
12. Jacob J., Linson N., Mavelil-Sam R. et al. Poly(lactic acid)/Nanocellulose Biocomposites for Sustainable Food Packaging // *Cellulose*. 2024. Vol. 31. P. 5997–6042. DOI: 10.1007/s10570-024-05975-w.
13. Guo Z., Wu X., Jayan H. et al. Recent Developments and Applications of Surface Enhanced Raman Scattering Spectroscopy in Safety Detection of Fruits and Vegetables // *Food Chemistry*. 2024. Vol. 434. P. 137469. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.137469.
14. Yang C., Guo Z., Fernandes Barbin D. et al. Hyperspectral Imaging and Deep Learning for Quality and Safety Inspection of Fruits and Vegetables: A Review // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2025. Vol. 73 (17). P. 10019–10035. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c11492>.
15. Бурак Л. Ч., Сапач А. Н. Инновационная упаковка для пищевых продуктов // *Научное обозрение. Технические науки*. 2023. № 2. С. 50–57. DOI: 10.17513/srts.1434.
16. Gupta P. Role of Oxygen Absorbers in Food as Packaging Material, Their Characterization and Applications // *Journal of Food Science and Technology*. 2024. Vol. 61. P. 242–252. DOI: 10.1007/s13197-023-05681-8.
17. Upadhyay A., Agbesi P., Arafat K. M. Y. et al. Bio-Based Smart Packaging: Fundamentals and Functions in Sustainable Food Systems // *Trends in Food Science & Technology*. 2024. Vol. 145. P. 104369. DOI: 10.1016/j.tifs.2024.104369.
18. Бурак Л. Ч., Сапач А. Н., Писарик М. И. Интеллектуальная упаковка для овощей и фруктов, классификация и перспективы использования: обзор предметного поля // *Health, Food & Biotechnology*. 2023. Т. 5. № 1. С. 51–80. DOI: 10.36107/hfb.2023.il.s165.
19. Marappan G., Tahir H. E., Karim N. et al. Natural Pigment-Based pH/Gas-Sensitive Intelligent Packaging Film for Freshness Monitoring of Meat and Seafood: Influencing Factors, Technological Advances, and Future Perspectives // *Food Reviews International*. 2025. Vol. 42. P. 58–95. DOI: 10.1080/87559129.2025.2473026.
20. Shiraiishi C. S., Roriz C. L., Carochi M. et al. Blockchain Revolution in Food Supply Chains: A Positive Impact on Global Food Loss and Waste // *Food Chemistry*. 2024. Vol. 467. P. 142331. DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.142331.
21. Abekoon T., Buthpitiya B., Sajindra H. et al. A Comprehensive Review to Evaluate the Synergy of Intelligent Food Packaging With Modern Food Technology and Artificial Intelligence Field // *Discover Sustainability*. 2024. Vol. 5. P. 160. DOI: 10.1007/s43621-024-00371-7.

22. Doğan V., Evliya M., Kahyaoglu L. N., Kılıç V. On-Site Colorimetric Food Spoilage Monitoring With Smartphone Embedded Machine Learning // *Talanta*. 2024. Vol. 266. P. 125021. DOI: 10.1016/j.talanta.2023.125021.
23. Cui F., Zheng S., Wang D. et al. Recent Advances in Shelf Life Prediction Models for Monitoring Food Quality // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2023. Vol. 22 (2). P. 1257–1284. DOI: 10.1111/1541-4337.13110.
24. Bilal M., Arslan M., Khan S. et al. Sustainable Food Packaging: Life Cycle Assessment, Recycling Innovations, and Pestalotopsis microspora in Biodegradable Solutions // *Trends in Food Science & Technology*. 2025. Vol. 166. P. 105400. DOI: 10.1016/j.tifs.2025.105400.
25. Reshma C., Remya S., Bindu J. A Review of Exploring the Synthesis, Properties and Diverse Applications of Poly Lactic Acid With a Focus on Food Packaging Application // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Vol. 283. P. 137905. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.137905.
26. Gundlapalli M., Ganesan S. Polyhydroxyalkanoates (PHAs): Key Challenges in Production and Sustainable Strategies for Cost Reduction Within a Circular Economy Framework // *Results in Engineering*. 2025. Vol. 26. P. 105345. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.105345.
27. Sharma S., Nakano K., Kumar S., Katiyar V. Edible Packaging to Prolong Postharvest Shelf-Life of Fruits and Vegetables: A Review // *Food Chemistry Advances*. 2024. Vol. 4. P. 100711. DOI: 10.1016/j.focha.2024.100711.
28. Kajla P., Chaudhary V., Dewan A. et al. Seaweed-Based Biopolymers for Food Packaging: A Sustainable Approach for a Cleaner Tomorrow // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2024. Vol. 274. P. 133166. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.133166.
29. Augusto A., Marques S., Félix R. et al. A Novel Seaweed-Based Biodegradable and Active Food Film to Reduce Freezer Burn in Frozen Salmon // *Food Hydrocolloids*. 2024. Vol. 156. P. 110332. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2024.110332.
30. Wu Y., Zhang J., Hu X. et al. Preparation of Edible Antibacterial Films Based on Corn Starch/Carbon Nanodots for Bioactive Food Packaging // *Food Chemistry*. 2024. Vol. 444. P. 138467. DOI: 10.1016/j.foodchem.2024.138467.
31. Joseph T. M., Azat S., Ahmadi Z. et al. Polyethylene Terephthalate (PET) Recycling: A Review // *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2024. Vol. 9. P. 100673. DOI: 10.1016/j.csee.2024.100673.
32. Hamzah M. H., Yuhana N. Y. Recycling Polyethylene Terephthalate as Food Contact Material: A Review of Technologies, Regulations, and Challenges // *Polymer-Plastics Technology and Materials*. 2025. Vol. 64 (14). P. 2129–2142. DOI: 10.1080/25740881.2025.2501161.
33. Бурак Л. Ч. Обзор разработок биоразлагаемых упаковочных материалов для пищевой промышленности // *Ползуновский вестник*. 2023. № 1. С. 91–105. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.012.
34. Islam M., Xayachak T., Haque N. et al. Impact of Bioplastics on Environment From Its Production to End-of-Life // *Process Safety and Environmental Protection*. 2024. Vol. 188. P. 151–166. DOI: 10.1016/j.psep.2024.05.113.
35. Wang S. S., Lin P., Wang C. C., Lin Y. C., Tung C. W. Machine Learning for Predicting Chemical Migration from Food Packaging Materials to Foods // *Food and Chemical Toxicology*. 2023. Vol. 178. P. 113942. DOI: 10.1016/j.fct.2023.113942.
36. Bonioli M., Bazzani C. Consumer Behaviour Toward “Smart” Food Labels: A Systematic Literature Review Using the Technology Acceptance Model // *Trends in Food Science & Technology*. 2025. Vol. 165. P. 105256. DOI: 10.1016/j.tifs.2025.105256.
37. Li S., Fang C., Wei N. et al. Antimicrobial, Antioxidative, and UV-Blocking Pectin/Gelatin Food Packaging Films Incorporated with Tannic Acid and Silver Nanoparticles for Strawberry Preservation // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. Vol. 308. P. 142445. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.142445.
38. Sobhy M., Elsamahy T., Abdelkarim E. A., Khojah E., Cui H., Lin L. Cardamom Essential Oil-Loaded Zinc Oxide Nanoparticles: A Sustainable Antimicrobial Strategy Against Multidrug-Resistant Foodborne Pathogens // *Microbial Pathogenesis*. 2025. Vol. 205. P. 107661. DOI: 10.1016/j.micpath.2025.107661.
39. Kowalonek J., Stachowiak-Trojanowska N., Ciecierska Z., Richert A. Zinc Oxide Nanoparticles and Sage (*Salvia officinalis*) Essential Oil as Active Components of Alginate Films for Food Packaging // *Polymer Degradation and Stability*. 2025. Vol. 237. P. 111328. DOI: 10.1016/j.polyimdegradstab.2025.111328.
40. Sun X., Wang H., Liang H., Meng N., Zhou N. Fabrication of Antimicrobial Chitosan/ZnO Nanoparticles/Lecithin-Montmorillonite Films for Food Packaging Application // *Food Hydrocolloids*. 2025. Vol. 159. P. 110686. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2024.110686.
41. Li D. Development and Evaluation of Titanium Dioxide / Chitosan Nanocomposite Coatings for Enhanced Food Preservation and Nutrient Retention // *Alexandria Engineering Journal*. 2025. Vol. 121. P. 484–491. DOI: 10.1016/j.aej.2025.02.091.
42. Mohanty S., Paul S. Eugenol-Loaded Functionalized TiO₂-Reinforced Chitosan-Guar Gum-Based Films with Photocatalytic Sterilization for Active Food Packaging Application // *Food Packaging and Shelf Life*. 2025. Vol. 49. P. 101477. DOI: 10.1016/j.fpsl.2025.101477.
43. Farokhnasab O., Moghadam A., Eslamifard Z., Moghadam A. H. Fabrication and Characterization of Chitosan-Based Bionanocomposite Coating Reinforced with TiO₂ Nanoparticles and Carbon Quantum Dots for Enhanced Antimicrobial Efficacy // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. Vol. 296. P. 139648. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.139648.
44. Christopher D., Anbalagan A., Govindarajan V. U., Muthuraman M. S. Biofabrication of Copper Oxide Nanoparticles Incorporated Chitosan/Gelatin Films for Food Packaging Applications // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024. Vol. 15. P. 27257–27274. DOI: 10.1007/s13399-024-05442-3.
45. Yan T., Ren Y., Zhang R. et al. Biodegradable Chitosan-Based Films Decorated with Biosynthetic Copper Oxide Nanoparticle for Post-Harvest Tomato Preservation // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. Vol. 295. P. 139595. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.139595.
46. Kumah E. A., Fopa R. D., Harati S., Boadu P., Zohoori F. V., Pak T. Human and Environmental Impacts of Nanoparticles: A Scoping Review of the Current Literature // *BMC Public Health*. 2023. Vol. 23 (1). P. 1059. DOI: 10.1186/s12889-023-15958-4.
47. de Lima G. G., Zakaluk I. C. B., Artner M. A. et al. Enhancing Barrier and Antioxidant Properties of Nanocellulose Films for Coatings and Active Packaging: A Review // *ACS Applied Nano Materials*. 2025. Vol. 8. P. 4397–4421. DOI: 10.1021/acsanm.4c04805.
48. Zhang R., Chai J., Guo W., Lu P., Wu R. Improved Paper Barrier Properties Based on Coating by Citric Acid Cross-linking of Hemicellulose // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025. Vol. 304. P. 140892. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.140892.
49. Zhang Z., Zhou R., Ke L. et al. Development of Multifunctional Metal-Organic Frameworks (MOFs)-Based Nanofiller Materials in Food Packaging: A Comprehensive Review // *Trends in Food Science & Technology*. 2024. Vol. 154. P. 104771. DOI: 10.1016/j.tifs.2024.104771.
50. Rothy J., Saikia A., Koti K. et al. Enhancing Shelf Life of Bison Meat Using CO₂/N₂ Modified Atmosphere Master Bag Packaging System With Oxygen Scavengers // *Meat Science*. 2025. Vol. 224. P. 109780. DOI: 10.1016/j.meatsci.2025.109780.

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest.