

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-347-356>



Поступила 09.10.2025

Поступила после рецензирования 24.06.2026

Принята в печать 26.06.2026

© Бурак Л. Ч., Завалей А. П., Сапач А. Н., 2026

<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Открытый доступ

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ БЛОКЧЕЙНА И ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ КОНТРОЛЯ БИОПЛЕНКИ В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ОБЗОР

Бурак Л. Ч.<sup>1\*</sup>, Завалей А. П.<sup>2</sup>, Сапач А. Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Общество с ограниченной ответственностью «БЕЛРОСАКВА», Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> Совместное общество с ограниченной ответственностью «Ароматик», Дзержинск, Минская область, Республика Беларусь

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

пищевые продукты,  
безопасность,  
биоупленка, контроль,  
интеграция,  
мониторинг,  
прослеживаемость,  
блокчейн,  
искусственный  
интеллект

Образование биопленки и ее устойчивость к применяемым традиционным методам очистки и дезинфекции в процессе переработки пищевых продуктов представляют значительную угрозу безопасности и качеству пищевых продуктов. Эти устойчивые микробные сообщества способствуют загрязнению, порче и, как следствие, развитию заболеваний пищевого происхождения, что подчеркивает необходимость инновационных и технологически ориентированных стратегий контроля. Целью данного научного обзора является анализ текущих и потенциальных возможностей применения блокчейна и искусственного интеллекта для мониторинга, контроля и предотвращения образования биопленок, а также определение направлений будущих исследований и практического применения этих технологий в области безопасности пищевых продуктов. Материалом для данного обзора послужили научные публикации 2020–2025 годов. Поиск проводили по ключевым словам в научных базах данных Scopus и Web of Science, Google Scholar и в Научной электронной библиотеке eLIBRARY.ru. Отбор публикаций проводили в два этапа: сначала по названию и аннотации, а затем на основе анализа полнотекстовых статей, соответствующих критериям включения. Анализ научных исследований последних лет показал, что такие современные цифровые технологии, как искусственный интеллект, открывают новые возможности для эффективного управления биопленками. В режиме реального времени блокчейн обеспечивает прослеживаемость санитарного состояния, случаев микробного загрязнения и принятых мер на всех этапах пищевой цепи. Кроме того, машинное обучение и мониторинг на основе датчиков способствуют оперативному контролю микробиологической стабильности, оценке рисков размножения микроорганизмов. В совокупности эти инструменты способствуют принятию решений на основе данных и более активному предотвращению загрязнения. Вместе с тем следует отметить, что интеграция данных требует значительных материальных затрат. Дальнейшие исследования должны быть направлены на совершенствование моделей искусственного интеллекта за счет повышения качества и расширения объема данных, а также на оценку надежности датчиков в промышленных условиях. Не менее важным направлением является изучение нормативно-правовой базы, обеспечивающей баланс между внедрением инноваций и соблюдением требований безопасности.

Received 09.10.2025

Accepted in revised 24.06. 2026

Accepted for publication 26.06.2026

© Burak L. Ch., Zavaley A. P., Sapach A. N. 2026

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

## MODERN BLOCKCHAIN AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES FOR BIOFILM CONTROL IN THE FOOD INDUSTRY. REVIEW

Leonid Ch. Burak<sup>1</sup>, \* Andrey P. Zavaley<sup>2</sup>, Alexander N. Sapach<sup>1</sup>

<sup>1</sup> BELROSAKVA Limited Liability Company, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup> Joint Limited Liability Vompny "Aromatic", Dzherzhinsk, Minsk Region, Republic of Belarus

### KEYWORDS:

food, safety, biofilm,  
control, integration,  
monitoring,  
traceability,  
blockchain, artificial  
intelligence

### ABSTRACT

Biofilm formation and its resistance to traditional cleaning and disinfection methods during food processing pose a significant threat to food safety and quality. These resilient microbial communities contribute to contamination, spoilage, and ultimately foodborne illness, highlighting the need for innovative and technology-driven control strategies. The objective of this scientific review is to analyze the current and potential roles of blockchain and artificial intelligence in biofilm management and to identify areas for future research and practical application of these technologies in food safety. This review focused on scientific publications published between 2022 and 2025. Keyword searches were conducted in the scientific databases Scopus and Web of Science, Google Scholar, and the Scientific Electronic Library "eLIBRARY.RU." Publications were selected in two stages: at first, by titles and abstracts, then based on the analysis of full-text papers corresponding to the inclusion criteria. The analysis of the scientific research of the last years showed that modern digital tools, such as artificial intelligence, offer new opportunities for improving biofilm management. Blockchain enables real-time traceability of sanitary status, contamination events, and compliance activities throughout the supply chain. Machine learning and sensor-based monitoring facilitate operative control of microbiological stability and risk assessment of microbial multiplication. Together, these tools support data-driven decision-making and more active pollution prevention. However, it should be noted that data integration is costly. Further research should focus on refining AI models by improving data quality and complementing it, assessing the reliability of sensors in industrial settings, and exploring regulatory frameworks that balance innovation and safety compliance.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бурак, Л. Ч., Сапач, А. Н., Завалей, А. П. (2026). Современные технологии блокчейна и искусственного интеллекта для контроля биопленки в пищевой промышленности. Обзор. *Пищевые системы*, 9(2), 347–356. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-347-356>

FOR CITATION: Burak, L. Ch., Zavaley, A.P., Sapach, A. N. (2026). Modern blockchain and artificial intelligence technologies for biofilm control in the food industry. Review. *Food Systems*, 9(2), 347–356. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-347-356>

## 1. Введение

Основная задача пищевой индустрии — обеспечение безопасности продуктов питания. Значимой проблемой в процессе производства является загрязнение биопленками, которые образуются на поверхностях, контактирующих с пищевыми продуктами, а также на технологическом оборудовании и в складских помещениях [1]. Данные микробные агрегаты обеспечивают защиту бактерий от воздействия факторов окружающей среды, воздействия моющих и дезинфицирующих средств, что позволяет бактериям длительное время сохраняться в технологической цепи. Такие патогены, как *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* spp. и *Escherichia coli*, используют биопленки в качестве защитных ниш, что влечет за собой риск вспышек пищевых отравлений, отзыв продукции и экономические потери [2]. Механическая очистка, мойка и дезинфекция, а также периодический микробиологический контроль не всегда обеспечивают полное удаление биопленки [3]. Достаточно сложная современная пищевая цепочка поставок, в которую вовлечены многие заинтересованные стороны, нуждается в прослеживаемости и прозрачности для обеспечения безопасности продуктов питания. Поэтому в последние годы все большее внимание научного сообщества привлекают инновационные технологии, такие как искусственный интеллект (ИИ) и блокчейн [4]. Традиционные методы контроля не поддерживают прослеживаемость в реальном времени, что затрудняет оперативное выявление случаев заражения или отслеживание их происхождения по всей цепочке поставок. Задержка обнаружения образования биопленки не только увеличивает риск персистенции микроорганизмов, но и затрудняет сдерживание их распространения [5,6]. В сфере безопасности пищевых продуктов блокчейн облегчает отслеживание источников загрязнения в режиме реального времени, проверку соблюдения гигиенических норм и соответствие санитарной обработки нормативным требованиям [7]. В сочетании с датчиками Интернета вещей (IoT) системы блокчейн способны автоматически регистрировать данные об условиях окружающей среды и санитарной обработке, повышая прослеживаемость и безопасность [8,9]. Искусственный интеллект дополняет блокчейн, используя машинное обучение, компьютерное зрение и распознавание образов для обнаружения образования биопленок на ранних стадиях на основе поведения микроорганизмов и факторов окружающей среды [10]. Несмотря на то, что во многих обзорных публикациях рассматривались цифровые технологии для общего управления безопасностью пищевых продуктов, на момент написания настоящего обзора нами не было выявлено работ, посвященных совместному применению блокчейна и искусственного интеллекта для контроля биопленок. Во многих исследованиях эти технологии рассматривались изолированно или были сосредоточены на мониторинге цепочки поставок или микробиологического загрязнения.

Настоящий научный обзор посвящен оценке современных и перспективных подходов к использованию блокчейна и искусственного интеллекта в управлении процессами образования биопленок в пищевой промышленности. В статье уделено внимание интеграции данных технологий для повышения эффективности обнаружения, прослеживаемости и минимизации последствий образования биопленок, а также выявлению перспективных направлений дальнейших исследований и практического внедрения.

## 2. Материалы и методы

Поиск литературы проводился с использованием трех научных баз данных — Web of Science, Scopus и PubMed. Поисковые запросы были сформулированы на основе соответствующих статей о блокчейне и искусственном интеллекте для контроля биопленки в пищевой промышленности. Были использованы следующие ключевые слова: «food», «safety», «biofilm», «control», «integration», «monitoring», «traceability», «blockchain», «artificial intelligence».

Критерии включения:

- (1) статья написана в период 2020–2025 гг.;
- (2) статья соответствует теме исследования;
- (3) публикация относится к одному из следующих типов: оригинальные исследовательские статьи, обзорные статьи, краткие отчеты.

Критерии исключения:

- (1) статья не соответствует теме данного обзора
- (2) статья написана не на английском языке, статья на русском языке не входит в РИНЦ;
- (3) содержание статьи не дублируется: при выявлении повторяющихся источников, извлеченных из разных баз данных или электронных библиотечных систем, такие публикации учитывались только один раз.

По результатам поиска из Web of Science, Scopus и PubMed было отобрано 145, 400 и 96 статей соответственно. После удаления дубликатов и проверки аннотаций и названий была проведена оценка 385 полнотекстовых статей. В итоге 99 исследований было включено в обзор на основании их релевантности теме исследования.

## 3. Образование биопленок в процессах переработки пищевых продуктов и цепочках поставок

Образование биопленки в пищевой промышленности и цепочках поставок является серьезной проблемой, поскольку оно способствует микробному загрязнению, порче пищевых продуктов и появлению стойких пищевых патогенов. Процесс образования биопленки включает в себя несколько этапов, начиная от прикрепления клеток бактерий к поверхностям за счет электростатического взаимодействия и гидрофобных сил. Дополнительной адгезии бактерий способствует наличие в пищевой цепи органических остатков, таких как белки и липиды [11]. Образование внеклеточных полимерных веществ (ВПВ), состоящих из полисахаридов, белков, внеклеточной ДНК и липидов, способствует стабилизации биопленки, обеспечивая целостность и устойчивость к факторам окружающей среды [12]. В процессе дальнейшего созревания биопленка образует трехмерную структуру с водными каналами, которые облегчают обмен питательными веществами и микробное взаимодействие. На последнем этапе биопленки высвобождают бактериальные клетки в окружающую среду, что вызывает обсеменение новых поверхностей и стойкое загрязнение [13]. На образование биопленок в условиях производства продуктов питания основное влияние оказывают такие факторы, как характеристика микроорганизмов, свойства поверхности и условия окружающей среды. Некоторые виды бактерий, такие как (например, *L. monocytogenes*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas fluorescens*, *Salmonella* Enteritidis и *Salmonella enterica*) обладают повышенной способностью к образованию биопленок [14]. Помимо характеристики микроорганизмов, немаловажную роль в процессе образования биопленок играют свойства материалов поверхностей, используемых в пищевой промышленности [15]. Нержавеющая сталь, полимерные пластмассы и резиновые прокладки, обычно используемые в оборудовании пищевых производств, неодинаково влияют на процесс образования биопленки. Например, шероховатость и водоотталкивающая способность таких материалов, как полиэтилен, способствуют адгезии бактерий, а наличие органических остатков существенно укрепляет структуру биопленки и повышает ее устойчивость [16]. Температура, влажность и наличие питательных веществ также оказывают влияние на образование биопленки. Так, например, низкая температура способствует выживанию *L. monocytogenes* и образованию биопленок на поверхностях холодильных установок и технологического оборудования. Напольные стоки, неиспользуемые распылительные форсунки и резервуары для воды на предприятиях пищевой промышленности создают благоприятную микросреду для размножения микроорганизмов и накопления биопленок. Способность психотропных бактерий *L. monocytogenes* выдерживать низкие температуры и их устойчивость к традиционным методам дезинфекции является значимой проблемой в производстве готовых к употреблению пищевых продуктов. На предприятиях молочной отрасли и переработки рыбы часто обнаруживаются представители рода *Pseudomonas* spp. Данные бактерии продуцируют протеолитические и липолитические ферменты, которые ухудшают качество пищевых продуктов и вызывают его порчу [17]. Такие патогены, как *S. enterica* и *Salmonella typhimurium*, образуют биопленки на поверхностях, включая пластик и стекло, проявляют устойчивость к кислой среде и высушиванию. Хорошо известный патоген *E. coli* O157: H7, который также образует биопленку, наиболее распространен на предприятиях мясной отрасли и в цепи поставок свежей продукции. Образование и сохранение биопленок в пищевой отрасли приводят к снижению качества продукции, экономическим потерям производителей и рискам для здоровья потребителей. Наибольшую тревогу исследователей вызывает повышенная устойчивость биопленок к дезинфицирующим и антимикробным средствам. Результаты исследований показали, что бактерии биопленки практически в 1000 раз устойчивее к санитарной обработке, чем их планктонные аналоги [18]. Источником многочисленных пищевых загрязнений, имеющих последствия для уязвимых групп населения, таких как беременные, пожилые люди и лица с ослабленным иммунитетом, являлись патогены *L. monocytogenes* и *Salmonella* [19]. Данные патогены устойчивы к антимикробным препаратам, что требует разработки современных инновационных методов контроля биопленок на всей цепочке поставок пищевой продукции. Понимание механизмов, которые лежат в основе развития биопленок, а также факторов, способствующих их сохранению, имеет решающее

значение для внедрения эффективных мер по борьбе с биопленками в пищевой промышленности.

#### 4. Технология блокчейн для борьбы с биопленками и обеспечения безопасности пищевых продуктов

Технология блокчейн способна максимально улучшить систему контроля безопасности продуктов питания. Ее внедрение на предприятии позволит обеспечить видимость в режиме реального времени, неизменность данных и сквозную прослеживаемость по всему циклу — от поставок сырья до реализации конечному потребителю. Как защищенный и децентрализованный реестр блокчейн записывает наиболее важные данные о безопасности пищевых продуктов. Так, например, в блокчейне могут регистрироваться данные контроля температуры пастеризации молочных продуктов, соков и напитков, а также результаты санитарно-микробиологического контроля санитарного состояния пищевых предприятий в режиме реального времени [20]. Внедрение технологии блокчейн позволит укрепить доверие между производителями, регулирующими органами и потребителями. Важной и эффективной возможностью применения технологии блокчейн является оперативное выявление источника микробного загрязнения. Контроль в режиме реального времени позволит оперативно локализовать источники загрязнения, что значительно снижает риски выпуска небезопасной продукции. Обеспечением прозрачности в цепочке поставок является регистрация неизменяемых данных каждого этапа от закупки сырья до поставки в торговую сеть [21]. Комбинирование блокчейна с датчиками Интернета вещей (IoT) и системами автоматизации обеспечит регистрацию данных о мойке и дезинфекции, а также результаты микробиологического контроля. Все это гарантирует непрерывный мониторинг объектов, наиболее подверженных образованию биопленок и являющихся контрольными критическими точками в технологическом процессе. Использование смарт-контрактов и автоматических систем оповещения позволит предприятиям не только эффективно бороться с возможным микробиологическим загрязнением, но и своевременно принимать профилактические меры [22]. Для максимальной эффективности интеграция блокчейна должна быть адаптирована к характеристикам и рискам, связанным с конкретными проблемными зонами, что позволит проводить вмешательства на основе данных и оперативно реагировать [23]. В совокупности такой подход максимально снизит риски микробного загрязнения, повысит ответственность производителей и уровень доверия потребителей к качеству и безопасности продуктов питания.

##### 4.1. Контрольные критические точки биопленки в системах производства продуктов питания

Если мойка и дезинфекция технологического оборудования были проведены недостаточно эффективно, то в труднодоступных для обработки местах происходит накопление биопленки, которая

представляет риск перекрестного загрязнения. Как уже отмечалось, поверхности, контактирующие с пищевыми продуктами, включая нержавеющую сталь, пластик и резину, способствуют сохранению биопленок по причине шероховатости поверхности и адаптации микроорганизмов. На Рисунке 1 представлена тепловая карта и гистограмма, показывающая относительные риски образования биопленок в различных зонах систем производства продуктов питания. Эти визуальные элементы выделяют критически важные области, требующие эффективной санитарной обработки и методов мониторинга. В этих целях технология блокчейн может быть интегрирована с датчиками IoT и системами мониторинга качества воды для создания в режиме реального времени неизменяемых записей о графиках санитарной обработки, результатах микробиологического анализа, состоянии санитарии и об условиях окружающей среды [24]. Улучшение прослеживаемости способствует обеспечению микробиологической стабильности продукции, ее соответствию нормативным требованиям и повышению подотчетности по всей цепочке поставок. Кроме того, это позволяет оперативно проводить вмешательства в зоны, подверженные образованию биопленок, тем самым повышая безопасность пищевых продуктов и минимизируя риски его загрязнения.

Эта горизонтальная гистограмма в виде тепловой карты визуализирует относительный риск образования биопленок в ключевых зонах предприятий пищевой промышленности. Каждый столбик окрашен в соответствии с градиентом от желтого (низкий риск) до красного (очень высокий риск), чтобы визуально представить степень риска образования биопленок. Эта диаграмма помогает определить приоритетные зоны для проведения мероприятий по очистке и мониторингу.

Влага, температурные колебания и остатки пищи создают благоприятные условия для образования биопленки на технологическом оборудовании пищевых производств такими бактериями, как *L. monocytogenes*, *Pseudomonas* spp. и *Salmonella* spp. Патогены легко прикрепляются к поверхностям, а элементы оборудования (ролики, шарниры, лезвия) с микротрещинами создают дополнительные укрытия для биопленок, снижая эффективность моющих и дезинфицирующих средств в процессе санитарной обработки [25]. Применение технологии блокчейн в комбинации с датчиками и системой видеонаблюдения позволит регистрировать критические точки санитарной обработки, своевременно выявлять проблемные зоны в режиме реального времени и включать оповещение для операторов. Fernández González et al. [26] провели пилотное исследование на предприятии по переработке молочной продукции: с помощью датчиков IoT, встроенных в поверхности, контактирующие с пищевыми продуктами, вели непрерывный контроль влажности и микробных метаболитов биопленки. Специалисты предприятия смогли отслеживать результаты санитарной обработки. Когда появлялась опасность образования биопленки, происходило автоматическое включение



режима повторной мойки и дезинфекции. Многие элементы технологического оборудования, изготовленные из нержавеющей стали, пластика и резины, служат источником скопления микроорганизмов, и традиционная санитарная обработка не обеспечивает их полное удаление. Благодаря стойкости к коррозии нержавеющая сталь считается наиболее приемлемой для пищевого производства. Однако неровности и незначительные царапины на поверхности создают благоприятные условия для адгезии бактерий и формирования биопленок. Поверхность из пластика и резины более пористая, что способствует более глубокому проникновению бактерий, и в таких местах удалить биопленку значительно труднее [26]. В исследовании Brás A. et al. [27] показано, что биопленки, сформированные на резиновых прокладках оборудования и пластиковых разделочных досках, содержащие патогены *E. coli* и *Staphylococcus aureus*, демонстрировали устойчивость к длительному выживанию. Кроме того, эти микроорганизмы хорошо адаптируются к стрессу, так как могут изменять геном. Защитные механизмы и изменения генома объясняют их устойчивость к широко используемым моющим веществам и дезсредствам на основе хлора. Совместное использование блокчейна и искусственного интеллекта помогает контролировать микробную обсемененность и графики мойки и дезинфекции, чтобы своевременно выявить потенциальную опасность. Это позволяет своевременно и эффективно проводить дезинфекцию, корректировать концентрацию и постоянно улучшать санитарный контроль [28]. Особое внимание необходимо уделять водопроводу и резервуарам для воды, поскольку там очень часто образуются бактериальные пленки, которые могут быть источником загрязнения всего технологического процесса производства [29]. Такие бактерии, как *P. aeruginosa* и *Legionella pneumophila*, легко выживают в трубах, скрываясь в биопленках. При колебании давления воды частицы биопленок отрываются и могут попадать в продукт [30]. Кроме того, остаточный хлор может вступать в реакцию с липидами и белками, находящимися в биопленке, образуя вредные побочные вещества [31]. Для предотвращения этого можно установить датчики качества воды, подключенные к блокчейну. Если они обнаружат аномальные уровни хлора или бактерий, смарт-контракты автоматически остановят конвейер. Система немедленно уведомит специалистов и запишет данные в защищенный от подделки журнал, обеспечивая соответствие всем стандартам безопасности. Холодильники и склады играют решающую роль в сохранении свежести продуктов, но даже низкие температуры не убивают бактериальные пленки. Некоторые микробы (*L. monocytogenes* и *Pseudomonas* spp.) способны адаптироваться к низким температурам. Они изменяют состав своих мембран и замедляют метаболизм, переходя в «сонный» режим, в котором могут выживать очень долго [32]. Чтобы избежать замерзания, эти бактерии вырабатывают специальные защитные белки и жирные кислоты, повышающие их стойкость к низким температурам. Кроме того, они образуют слой слизи, в который очень трудно проникают дезинфицирующие средства [33]. Системы на основе блокчейна помогают управлять данной ситуацией: они постоянно контролируют температуру и влажность, сравнивая фактические условия с санитарными нормами. В случае возникновения проблем система немедленно отправляет уведомление, и все принятые меры записываются в блокчейн с точным временем. Такая прозрачная проверка гарантирует правильное хранение пищевых продуктов и предотвращает образование опасных биопленок [34].

## 5. Процесс мониторинга с технологией блокчейн

Блокчейн позволяет осуществлять мониторинг процессов дезинфекции в производстве в режиме реального времени. Он может быть использован для реализации эффективных мер борьбы с бактериальными пленками. Ключевой особенностью здесь является создание цифровых журналов, которые невозможно изменить и подделать. Система записывает все: когда было вымыто оборудование, какие средства использовались, а также результаты микробиологических тестов в опасных зонах. Это гарантирует точность данных о безопасности пищевых продуктов (стандарты НАССР и GMP) [35]. Еще одно важное преимущество — обнаружение источников инфекции с помощью интеллектуальных датчиков (IoT). Они постоянно проверяют оборудование и поверхности, передавая данные непосредственно в блокчейн. Если уровень бактерий становится критическим, система автоматически отправляет сигнал тревоги в отдел качества. Это позволяет быстро принять меры до того, как пленка успеет образоваться. Кроме того, ИИ анализирует накопленные данные, выявляет закономерности и помогает прогнозировать, где могут возникнуть новые инфекции [36,37]. Технологи блокчейн делают всю цепочку поставок прозрачной. Производители, а также инспекционные органы и потребители могут видеть достоверную информацию о состоя-

нии санитарии на производстве. Когда каждый этап документируется в блокчейне, это повышает уровень доверия к бренду, поскольку подтверждает соответствие продукции всем стандартам качества и безопасности [38]. Система блокчейна упрощает аудиты: внешние инспекторы могут в любое время сравнить отчеты об очистке с результатами испытаний в блокчейне. Этот метод уже успешно используется на мясоперерабатывающих предприятиях и в молочной отрасли. Внедрение блокчейна помогло этим предприятиям значительно снизить уровень загрязнения продукции, обеспечить микробиологическую стабильность и соблюдать установленные требования [39]. Аналогичным образом, в индустрии напитков решения для мониторинга на основе блокчейна позволяют отслеживать микробную нагрузку на линиях розлива и трубопроводах, а также оптимизировать процессы очистки и предотвращать порчу продукции. Эти приложения доказали свою эффективность в повышении прослеживаемости и обеспечении соблюдения гигиенических нормативов. Они также помогают минимизировать отзывы продукции, связанные с биопленками [40]. Молочное предприятие внедрило биосенсоры с интегрированной технологией блокчейн для мониторинга накопления биопленки *Listeria* на поверхностях из нержавеющей стали. Эта система способствовала снижению рисков вспышек заболеваний, обеспечив целенаправленные меры санитарной обработки и полную прослеживаемость зараженных партий [41]. На предприятиях по переработке морепродуктов блокчейн был объединен с биосенсорами на базе IoT для мониторинга образования биопленки на конвейерных лентах, поверхностях, контактирующих с рыбой, и резервуарах для хранения [42]. В Норвегии на предприятии по переработке лосося внедрила технологию блокчейн для мониторинга чистоты на всех этапах процесса охлаждения рыбы. Это помогло повысить прозрачность и значительно снизить бактериальное загрязнение (*Pseudomonas* spp. и *L. monocytogenes*) [43]. В настоящее время аналогичные системы используются на рыбоводческих фермах: датчики отслеживают качество воды (мутность, pH и наличие микроорганизмов) в режиме реального времени и записывают данные в блокчейн. Это позволяет владельцам ферм оперативно реагировать на нарушения гигиены и заболевания рыбы, что имеет огромное значение для экспортных поставок [41]. В дельте Меконга во Вьетнаме запуск аналогичного проекта позволил фермерам сократить использование антибиотиков благодаря созданию должного санитарного уровня. В результате улучшилось качество продукции, что привело к повышению ее востребованности за рубежом. Эти примеры показывают эффективность блокчейна не только в производстве молока и напитков, но и в рыболовной отрасли, где риск загрязнения продукции очень высок [44,45]. Конечно, необходимо отметить, что широкое внедрение блокчейна в настоящее время сдерживается высокими затратами, техническими трудностями и отсутствием единых нормативов и правил. Для решения этих проблем необходимо тесное сотрудничество между предприятиями, государственными органами и разработчиками программного обеспечения. В дальнейшем основное внимание следует уделить созданию доступных и простых платформ, которые смогут позволить себе даже небольшие компании и предприятия. Пилотные программы, демонстрирующие реальную прибыльность и снижение рисков, помогут технологии блокчейн стать стандартом и найти широкое применение в пищевой промышленности.

## 6. Роль искусственного интеллекта (ИИ) в борьбе с биопленкой

Искусственный интеллект значительно изменил подход к безопасности пищевых продуктов. Машинное обучение и компьютерное зрение теперь могут не только обнаруживать опасные микробные популяции, но и более эффективно контролировать гигиену на предприятиях. Эти программы анализируют большой объем данных, включая результаты анализов и изменения температуры и влажности. Это важно, поскольку биопленки растут наиболее быстро во влажных и теплых условиях [46]. Специальные камеры (компьютерное зрение) в сочетании с датчиками позволяют обнаруживать налет даже там, где его не видит человеческий глаз — на конвейерах и рабочих поверхностях [47].

Искусственный интеллект стал революционным инструментом в области безопасности пищевых продуктов, предлагая передовые решения для обнаружения и предотвращения образования биопленок. Технологии, основанные на ИИ, включая машинное обучение, компьютерное зрение и глубокое обучение, позволяют точно идентифицировать микробные биопленки и улучшать управление гигиеной пищевых продуктов [46]. Модели машинного обучения анализируют обширные наборы данных микробиологических исследований, а также факторы окружающей среды, такие как повышенная влажность или

колебания температуры, которые тесно связаны с развитием биопленок в условиях пищевой промышленности [38]. Мониторинг биопленок в режиме реального времени значительно улучшается благодаря технологиям визуализации и сенсорным технологиям, основанным на ИИ. Компьютерное зрение в сочетании с гиперспектральной визуализацией и обнаружением на основе флуоресценции позволяет точно идентифицировать наличие биопленок на поверхностях, контактирующих с пищевыми продуктами, и на технологическом оборудовании [47]. Например, системы гиперспектральной визуализации с поддержкой ИИ достигли точности обнаружения, превышающей 90 %, с показателем полноты обнаружения выше 88 %, как сообщалось в недавних пилотных исследованиях [48,49]. Кроме того, сети датчиков IoT на базе ИИ непрерывно отслеживают рост микроорганизмов, условия окружающей среды и эффективность санитарной обработки, обеспечивая раннее обнаружение биопленок до того, как риски загрязнения возрастут [49]. Пилотные исследования продемонстрировали практическое применение этих технологий. Прототип гиперспектральной системы визуализации на основе ИИ был протестирован на молочном заводе, достигнув точности более 90 % в обнаружении биопленок *Listeria* на поверхностях из нержавеющей стали, что позволило проводить целенаправленные мероприятия по очистке [50]. Другой пилотный проект на мясоперерабатывающем предприятии интегрировал алгоритмы машинного обучения с данными датчиков для прогнозирования очагов образования биопленок, снизив количество случаев загрязнения на 30 % в течение 6 месяцев [51]. Основные методы применения ИИ для мониторинга и блокирования роста бактериальных пленок обобщены в Таблице 1. В ней показано, как различные алгоритмы решают конкретные задачи в производстве.

## 7. Использование блокчейна и ИИ для управления биопленками

Комбинированное использование блокчейна и искусственного интеллекта в индустрии пищевой безопасности — это принципиально новый этап в борьбе с биопленками. Главная ценность этой связи заключается в синергии: если блокчейн гарантирует абсолютную прозрачность и неизменность истории данных, то ИИ привносит в систему «мозг» — способность предсказывать опасность микробной обсемененности и мгновенно анализировать ситуацию. Такой тандем позволяет вывести управление качеством на принципиально иной уровень [35,61]. Взаимодействуя, эти технологии обеспечивают непрерывный цикл контроля: от ранней фиксации признаков загрязнения до превентивного вмешательства в процесс их формирования. Ключевой фактор успеха заключается в моментальном обмене данными и использовании прогнозных моделей. Блокчейн выступает в роли сверхнадежного цифрового журнала, куда записываются показатели датчиков и выводы алгоритмов ИИ. Благодаря децентрализации эта информация остается доступной и защищенной для всех звеньев логистической цепочки. Конечные пользователи и надзорные органы могут отслеживать санитарные риски в реальном времени через привычные цифровые инструменты: от мобильных приложений до облачных дашбордов [62]. Интеграция ИИ с блокчейном еще больше укрепляет системы безопасности пищевых продуктов, обеспечивая прослеживаемость, соответствие требованиям и проактивное управление рисками, что значительно снижает количество случаев загрязнения, связанных с биопленками. Обзор результатов исследований интеграции блокчейна и искусственного интеллекта для контроля биопленки представлен в Таблице 2.

Таблица 1. Обзор основных методов применения искусственного интеллекта (ИИ)

Table 1. Overview of the main methods for using artificial intelligence (AI)

| Элементы ИИ                                            | Выполняемые функции                                                                                                                          | Управление биопленкой                                                                                                                               | Примеры использования                                                                                                                                   | Источник |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Машинное обучение (МО)                                 | Собирает и изучает всю информацию обо всех случаях заражения, чтобы заранее рассчитать вероятность возникновения нового случая инфицирования | Создает модели, которые прогнозируют, какие конкретные производственные зоны или оборудование подвержены более высокому риску образования биопленки | На молочных заводах такие модели помогают выявлять <i>L. monocytogenes</i> до их распространения                                                        | [52]     |
| Глубокое обучение                                      | Использует передовые нейронные сети, способные «видеть» микробы на сложных микроскопических изображениях                                     | Используя мультиспектральный анализ, обнаруживает даже мельчайшие следы пленки, невидимые при обычном осмотре                                       | Программное обеспечение обнаруживает <i>Salmonella</i> на поверхностях, анализируя спектр отраженного света                                             | [53]     |
| Биосенсоры на базе ИИ                                  | Обнаруживают специальные вещества (маркеры), выделяемые бактериями в начале построения их защитной оболочки                                  | Помогают быстро обнаруживать загрязнения в трубах и системах водоснабжения, где ручной осмотр наиболее затруднен                                    | Интеллектуальный датчик обнаруживает кишечную палочку ( <i>E. coli</i> ) посредством химического анализа воды и немедленно передает данные в общую сеть | [54]     |
| Обработка естественного языка (ОЕЯ)                    | Анализирует отчеты о санитарных нормах и соблюдении нормативных требований для оценки риска образования биопленки                            | На основе отчетов по контролю выявляет потенциальные риски, связанные с биопленкой                                                                  | Система анализирует отчеты HACCP и определяет наиболее уязвимые критические точки на предприятии                                                        | [55]     |
| Автономные роботы-уборщики с искусственным интеллектом | Используют навигацию на основе искусственного интеллекта для обнаружения очагов биопленки                                                    | Повышают качество обработки труднодоступных поверхностей, контактирующих с пищевыми продуктами                                                      | Роботизированная система на основе ИИ для удаления биопленки при переработке морепродуктов                                                              | [56]     |
| Гибридные подходы к ИИ                                 | Объединяет несколько методов ИИ для улучшенного контроля биопленки                                                                           | Интегрирует машинное обучение, Интернет вещей и биосенсоры для комплексного мониторинга                                                             | Комбинированный подход МО-биосенсора для биопленок <i>S. aureus</i>                                                                                     | [57]     |
| Химическая оптимизация с использованием ИИ             | Прогнозирует оптимальные формулы биоцидов и дезинфицирующих средств                                                                          | Снижает устойчивость к противомикробным препаратам, сохраняя при этом эффективность                                                                 | Оптимизированная для ИИ формула дезинфицирующего средства для контроля биопленки на молочных заводах                                                    | [58]     |
| ИИ в прогнозировании устойчивости биопленки            | Анализирует данные генетической и фенотипической резистентности                                                                              | Прогнозирует новые тенденции резистентности у бактерий, образующих биопленку в пищевых продуктах                                                    | Профилирование резистентности <i>Campylobacter jejuni</i> у домашней птицы с помощью ИИ                                                                 | [56]     |
| Мониторинг окружающей среды с помощью ИИ               | Учитывает условия окружающей среды с рисками образования биопленки                                                                           | Корректирует методы обработки на основе влажности, температуры и pH                                                                                 | Моделирование влияния микроклимата на образование биопленки на молочных предприятиях с помощью ИИ                                                       | [59]     |
| Системы принятия решений с поддержкой ИИ               | Предоставляет рекомендации в режиме реального времени для отдела качества на предприятии                                                     | Уменьшает время реагирования на случаи загрязнения биопленкой                                                                                       | Система поддержки принятия решений HACCP на базе ИИ для снижения рисков образования биопленки                                                           | [60]     |

Таблица 2. Обзор интеграции блокчейна и ИИ для контроля биопленки  
Table 2. Overview of blockchain and AI integration for biofilm control

| Основные цели интеграции                            | Функция блокчейна                                                                                       | Функция ИИ                                                    | Ожидаемый результат                                                             | Источ-ник |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Безопасный сбор данных                              | Хранит защищенные т несанкционированного доступа записи с датчиков, отслеживающих образование биопленки | Обработывает и анализирует данные датчиков в реальном времени | Обеспечивает точные и неизменяемые записи о росте биопленки                     | [63]      |
| Смарт-контракты для протоколов санитарии            | Обеспечивают соблюдение протоколов санитарии                                                            | Обнаруживают аномалии                                         | Обеспечивают соответствие                                                       | [64]      |
| Прослеживаемость источников загрязнения             | Устанавливает следы загрязнения                                                                         | Предсказывает источники                                       | Обеспечивает более быстрое сдерживание                                          | [24]      |
| Оповещения о загрязнении в режиме реального времени | Регистрируют события загрязнения                                                                        | Запускают оповещения                                          | Обеспечивает оперативное реагирование                                           | [25]      |
| Графики прогностического обслуживания               | Хранят журналы использования                                                                            | Предсказывают неудачи                                         | Предотвращают риски загрязнения                                                 | [56]      |
| Графики прогностического обслуживания               | Хранят журналы использования                                                                            | Предсказывают неудачи                                         | Предотвращают риски загрязнения                                                 | [35]      |
| Децентрализованный обмен данными о биопленке        | Обеспечивает безопасный децентрализованный обмен данными о биопленке                                    | Анализирует модели риска                                      | Улучшает сотрудничество между участниками производственно-логистической цепочки | [35]      |
| Системы отчетности, готовые к аудиту                | Поддерживают неизменяемые аудиторские отчеты                                                            | Автоматизируют генерацию отчетов                              | Упрощают аудит                                                                  | [65]      |
| Оптимизация ресурсов на основе ИИ                   | Ведет цифровой учет использования химикатов                                                             | Обеспечивает рациональное использование ресурсов              | Способствует устойчивому развитию                                               | [66]      |

## 8. Роль Интернета вещей (IoT) в борьбе с биопленками с помощью блокчейна и искусственного интеллекта

Системы на основе IoT используют интеллектуальные датчики и мониторинг в реальном времени для обнаружения микробного загрязнения, в то время как блокчейн обеспечивает безопасное управление данными, а ИИ позволяет проводить прогнозный анализ для упреждающего вмешательства. Эта синергия повышает эффективность обнаружения биопленок, снижает риски загрязнения и улучшает управление безопасностью пищевых продуктов [18]. Биосенсоры с поддержкой IoT, включая оптические, электрохимические и нанотехнологические платформы, обнаруживают образование биопленок в режиме реального времени. Эти датчики отслеживают микробную активность на поверхностях, контактирующих с пищевыми продуктами, на технологическом оборудовании и в складских помещениях, идентифицируя патогены, такие как *L. monocytogenes*, *P. aeruginosa*, *P. fluorescens*, *S. enterica*, *S. typhimurium* и *S. enteritidis*. Анализ данных датчиков с помощью ИИ прогнозирует очаги загрязнения и оптимизирует параметры обработки, а автоматические оповещения запускают своевременные меры санитарной обработки, снижая устойчивость биопленок. IoT облегчает мониторинг микробной активности в режиме реального времени по всей цепочке поставок пищевых продуктов с использованием RFID-меток, беспроводных сенсорных сетей и облачных платформ [67,68]. Например, беспроводные сенсорные сети и RFID-метки широко используются для мониторинга микробиоты в режиме реального времени по всей цепочке поставок продуктов питания, что позволяет оперативно реагировать на нарушения гигиены на предприятиях по переработке мяса и молочных продуктов [69]. На птицеперерабатывающих заводах датчики IoT были интегрированы с алгоритмами ИИ для обнаружения раннего образования биопленок на конвейерных лентах, что запускало автоматическую активацию системы CIP и сокращало количество случаев загрязнения более чем на 30% [70]. Аналогичным образом, на одном из европейских предприятий по упаковке свежих продуктов были внедрены электрохимические биосенсоры с поддержкой IoT в сочетании с блокчейном для мониторинга биопленок *Listeria*, что привело к сокращению количества отзывов продукции из-за загрязнения на 25% [71]. Интеграция блокчейна обеспечивает прозрачную и защищенную от подделки документацию о случаях загрязнения и санитарных записях. Прогностические модели на основе ИИ анализируют тенденции загрязнения, позволяя адаптировать графики уборки и антимикробные мероприятия. Интеллектуальная автоматизация, такая как системы CIP с управлением датчиками, повышает эффективность санитарной обработки, минимизируя чрезмерное использование химикатов и обеспечивая безопасность пищевых продуктов. Огромный объем данных, генерируемых устройствами IoT, требует надежных мер безопасности. Блокчейн обеспечивает целостность данных, предоставляя неизменяемую, децентрализованную запись случаев загрязнения и мероприятий по его устранению [72].

### 8.1. Цифровые биосенсоры для быстрого обнаружения биопленок

Разработка цифровых биосенсоров кардинально изменила подход к обнаружению биопленок в пищевой промышленности, обеспечив мониторинг в реальном времени и раннее вмешательство. Передовые технологии биосенсорики обеспечивают быстрый, чувствительный и неинвазивный подход к обнаружению биопленок, минимизируя риски загрязнения и улучшая санитарно-гигиенический контроль. Традиционные методы обнаружения микроорганизмов, такие как культуральные методы и полимеразная цепная реакция (ПЦР), как правило, являются трудоемкими и занимают много времени. В то же время цифровые биосенсоры позволяют быстро и в реальном времени обнаруживать биопленки, выявляя биохимические изменения, связанные с прикреплением микроорганизмов и производством ВПВ на ранних стадиях образования [73]. Биосенсоры на основе ИИ используют машинное обучение для анализа закономерностей роста микроорганизмов, улучшая прогнозируемое обнаружение, а биосенсоры с поддержкой IoT передают данные о загрязнении в облачные системы управления безопасностью пищевых продуктов. Кроме того, технология блокчейн обеспечивает безопасную документацию показаний биосенсоров, предоставляя проверяемые записи для соблюдения нормативных требований [74].

Биосенсоры обнаруживают биопленки, ориентируясь на метаболическую активность микроорганизмов, свойства адгезии и компоненты внеклеточных полимерных веществ (ВПВ). Электрохимические биосенсоры отслеживают окислительно-восстановительные реакции, связанные с метаболизмом микроорганизмов или изменениями поверхностной проводимости, а импедансные датчики измеряют изменения электрического сопротивления, вызванные адгезией биопленки [75]. Амперометрические и потенциометрические датчики обнаруживают побочные продукты метаболизма микроорганизмов, такие как перекись водорода и органические кислоты, сигнализируя о наличии биопленки. Современные методы обнаружения биопленок во многом опираются на возможности оптических биосенсоров. Системы, работающие на принципах флуоресценции или поверхностного плазмонного резонанса, фиксируют изменения в показателях преломления и интенсивности свечения в момент, когда микроорганизмы закрепляются на поверхности [76]. Значительное развитие в этом направлении произошло благодаря внедрению наноматериалов: использование графена, углеродных нанотрубок и золотых наночастиц на порядок подняло уровень чувствительности приборов [77].

Такие наносенсоры не просто точнее фиксируют сигнал, они позволяют «засечь» формирование биопленки на самых ранних этапах благодаря сверхнизким пределам обнаружения. Комбинируя оптические, электрохимические и нанотехнологические решения, инженеры получают платформы для оперативного вмешательства, что критически важно для снижения рисков микробного загрязнения.

Дальнейший прогресс здесь неразрывно связан с цифровизацией: объединение сенсоров с ИИ, интернетом вещей (IoT) и блокчейном превращает разрозненные данные в интеллектуальную систему

контроля [78,79]. Очевидно, что по мере совершенствования этих технологий методы обеспечения пищевой безопасности станут более точными, а роль биосенсоров в управлении качеством продуктов будет только расти.

### 8.2. Интеллектуальная упаковка с интегрированной технологией блокчейн для предотвращения образования биопленок

Интеллектуальная упаковка на основе блокчейна обеспечивает прозрачную, защищенную от подделки запись условий хранения и рисков микробного загрязнения, позволяя заинтересованным сторонам отслеживать качество пищевых продуктов на протяжении всего процесса распределения. Эта система обеспечивает целостность пищевых продуктов путем безопасной записи данных датчиков в децентрализованный реестр, к которому могут получить доступ в реальном времени производители, розничные продавцы и потребители. Это способствует предотвращению загрязнения, связанного с биопленками [80]. Ключевой особенностью интеллектуальной упаковки является включение датчиков времени и температуры, которые отслеживают условия окружающей среды, влияющие на рост микроорганизмов [80,81]. Еще одним важным нововведением в области интеллектуальной упаковки является применение антимикробных покрытий, предназначенных для подавления образования биопленок. Упаковочные материалы с антимикробными агентами, такими как наночастицы серебра, органические кислоты и эфирные масла, создают неблагоприятную поверхность для адгезии микроорганизмов [81]. В сочетании с мониторингом на основе блокчейна интеллектуальная антимикробная упаковка обеспечивает комплексную защиту от микробного загрязнения, предотвращая образование биопленок и поддерживая проверяемые данные о безопасности [82]. Синергия между технологией блокчейн и интеллектуальной упаковкой значительно повышает эффективность управления безопасностью пищевых продуктов, обеспечивая доступ к данным в режиме реального времени, автоматическое обнаружение загрязнений и надежную документацию параметров качества пищевых продуктов [83]. По мере развития исследований дальнейшие инновации в сенсорных технологиях и антимикробных упаковочных материалах оптимизируют стратегии предотвращения образования биопленок, обеспечивая более безопасную и надежную цепочку поставок пищевых продуктов.

### 8.3. Дополненная реальность (AR) и виртуальная реальность (VR) для обучения методам борьбы с биопленками

Технологии дополненной реальности (AR) и виртуальной реальности (VR) обеспечивают захватывающие интерактивные среды обучения, которые улучшают способность работников выявлять, оценивать и удалять биопленки на предприятиях пищевой промышленности [83]. В отличие от традиционных подходов к обучению, которые основаны на теоретическом инструктаже и периодических семинарах, AR и VR предлагают динамические симуляции в реальном времени, которые воспроизводят сценарии загрязнения, что делает обучение контролю биопленок более эффективным и увлекательным [84]. Технология дополненной реальности (AR) накладывает цифровую информацию на физическую среду, позволяя работникам визуализировать микробное загрязнение поверхностей в режиме реального времени. Эти системы могут быть запрограммированы на распознавание различных микробных опасностей, предоставляя индивидуальные инструкции по устранению различных рисков загрязнения. Такое руководство минимизирует ошибки в борьбе с биопленками и обеспечивает соблюдение строгих правил безопасности пищевых продуктов [85]. Виртуальная реальность (VR), напротив, погружает обучающихся в полностью смоделированную среду, воспроизводя сложные процессы образования и удаления биопленок с высокой точностью [16,86]. Модули на основе виртуальной реальности позволяют работникам непосредственно столкнуться с ситуациями загрязнения, проверяя их способность идентифицировать биопленки, выбирать подходящие дезинфицирующие средства и применять стратегии очистки без рисков, связанных с ошибками в реальной жизни [87]. Виртуальные симуляции позволяют наглядно разбирать микробиологические механизмы формирования биопленок в самых разных условиях. Благодаря такому погружению персонал получает гораздо более четкое представление о том, как именно развиваются процессы загрязнения на производстве. Помимо чисто образовательной функции, технологии дополненной и виртуальной реальности (AR/VR) упрощают выполнение нормативных требований: они предлагают стандартизированные сценарии обучения, полностью отвечающие протоколам безопасности вроде HACCP или FSMA. Если же объединить AR/VR с облачными системами управления обучением, компания может полностью автоматизировать

контроль квалификации сотрудников — от отслеживания прогресса до фиксации статуса сертификации в едином цифровом реестре [88].

### 8.4. Применение «искусственной кожи» и носимых сенсоров для обнаружения биопленок

Прогресс в области сенсорики привел к появлению носимых устройств и систем на базе «искусственной кожи», способных мониторить микробный фон на пищевых объектах в режиме реального времени [89,90]. Подобные датчики, интегрированные непосредственно в перчатки, браслеты или элементы защитной одежды, обеспечивают непрерывное и неинвазивное наблюдение. Это позволяет существенно снизить риск перекрестного загрязнения, не останавливая производственный цикл.

Технологически такие биосенсоры базируются на гибких биосовместимых подложках с наноструктурированными преобразователями. Они способны распознавать специфические химические «отпечатки» биопленок — например, продукты метаболизма или сигнальные молекулы чувства кворума (EPS) [91]. Как только уровень загрязнения превышает норму, сотрудник мгновенно получает обратную связь через визуальный индикатор или цифровое уведомление [92]. Несмотря на перспективность, массовое внедрение подобных гаджетов пока ограничено вопросами их долговечности, устойчивости к регулярной дезинфекции и необходимости тщательной калибровки в реальных цеховых условиях. Обеспечение возможности многократного использования этих устройств, их устойчивости к протоколам очистки и тестирования в различных пищевых средах остается ключевой проблемой для их широкого внедрения [93]. «Умный» текстиль расширяет возможности применения носимых биосенсоров в мониторинге микроорганизмов за счет включения проводящих волокон и микрофлюидных сетей, способных обнаруживать адгезию бактерий и метаболическую активность. Эти текстильные изделия, встроенные в рабочую униформу или фартуки, могут непрерывно оценивать уровни загрязнения и передавать данные в централизованную систему управления безопасностью пищевых продуктов [94,95]. Будущее технологий обнаружения биопленок на основе искусственной кожи и носимых устройств заключается в их бесшовной интеграции с цифровыми платформами безопасности пищевых продуктов, аналитикой на основе ИИ и автоматизированными системами управления гигиеной.

## 9. Проблемы и ограничения внедрения блокчейна и искусственного интеллекта в управлении биопленками

Хотя блокчейн и ИИ обладают огромным потенциалом для трансформации в управлении биопленками, для их успешного внедрения в пищевой промышленности необходимо решить ряд проблем. Эти проблемы затрагивают технические, финансовые, нормативные и этические аспекты, требуя целенаправленных исследований, межотраслевого сотрудничества и стратегической реализации. Одной из основных технических трудностей является интеграция данных [67]. Эффективность комбинирования блокчейна и ИИ напрямую зависит от качества и объема поступающих данных. Информация поступает из множества источников — от датчиков IoT до производственных журналов, при этом свести ее в единую, пригодную для анализа систему крайне сложно. Главными барьерами здесь является отсутствие стандартизации и задержки в обработке потоков в реальном времени [96]. Ситуацию усложняют ошибки калибровки сенсоров и плохая фильтрация «шума», что напрямую влияет на скорость реакции системы и на точность прогнозов [97].

Масштабируемость остается ключевым ограничением для малого и среднего бизнеса. Существующая инфраструктура зачастую недостаточно гибка для быстрой адаптации к специфическим условиям конкретного производственного участка. При этом точность ИИ-моделей критически зависит от того, насколько полными и достоверными будут исходные данные [56]. Любой дефицит информации делает прогнозы неточными, что фактически делает неэффективными все стратегии по предотвращению образования биопленок [56]. Нельзя игнорировать и финансовую сторону вопроса. Огромные затраты на разработку, монтаж и поддержку вычислительных мощностей становятся непреодолимой преградой для многих игроков рынка [98]. К этому стоит добавить кадровый голод: отрасли остро нужны не просто техники, а специалисты на стыке анализа данных и микробиологии. Возможным решением здесь могло бы стать государственное финансирование и вовлечение небольших предприятий в пилотные программы на льготных условиях.

Наконец, внедрение технологий сдерживается фрагментированностью нормативно-правовой базы. Пищевая промышленность — отрасль, требующая строгого санитарно-микробиологического контроля

на всех этапах производства, однако единых международных протоколов для обмена данными в блокчейн-системах пока не существует. Это приводит к разрывам в цепочках поставок и снижает эффективность межорганизационного взаимодействия. Очевидно, что ключевая роль в решении данной проблемы должна принадлежать организации ISO, чьи стандарты способны обеспечить гармонизацию цифровых систем безопасности в глобальном масштабе [99]. Параллельно необходимо учитывать этические аспекты: прозрачность блокчейн-систем не должна приводить к утечке запатентованных технологий или коммерческой тайны компаний.

## 10. Заключение

Борьба с биопленками в современной пищевой отрасли требует перехода от точечных мер к многоуровневым системам, в которых передовой мониторинг интегрирован с современными антимикробными методами. В настоящее время взаимосвязь блокчейна и искусственного интеллекта позволяет не только фиксировать случаи бактериального загрязнения продукции, но и осуществ-

лять прогнозирование и предотвращение рисков. Блокчейн обеспечивает прозрачность истории каждой санитарной обработки, а нейросети реализуют предиктивную аналитику. Дополнительный потенциал создает внедрение IoT-устройств, которые превращают непрерывный сбор данных в реальный инструмент защиты продуктов питания.

Тем не менее, внедрение данных технологий сдерживается высокими затратами, нормативными проблемами и разрывом между лабораторными разработками и промышленной практикой. Чтобы преодолеть этот барьер, отрасли необходим переход к единым протоколам данных и активное инвестирование в обучение людей, способных работать с цифровыми системами. Государственно-частное партнерство и запуск пилотных проектов способны продемонстрировать рентабельность таких вложений. В будущем фокус исследований должен сместиться на повышение качества данных для обучения ИИ, на проверку живучести датчиков в агрессивных средах и на поиск баланса между внедрением инноваций и жесткими требованиями безопасности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Бурак, Л. Ч. (2025). Перспективы использования технологии сверхкритического диоксида углерода в пищевой промышленности. Обзор предметного поля. *Ползуновский вестник*, 1, 32–50. [Burak, L. Ch. (2025). Prospects for using supercritical carbon dioxide technology in food industry. Subject field overview. *Polzunovsky Vestnik*, 1, 32–50. (In Russian)] <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.004>
2. Бурак, Л. Ч., Завалей, А. П. (2024). Эффективность комбинированного воздействия ультразвука и микроволн при обработке пищевых продуктов. Обзор. *Техника и технология пищевых производств*, 54(2), 342–357. [Burak, L. Ch., Zavalei, A. P. (2024). Combined ultrasound and microwave food processing: Efficiency review. *Food Processing: Techniques and Technology*, 54(2), 342–357 (In Russian)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2024-2-2510>
3. Dallagi, H., Jha, P. K., Faille, C., Le-Bail, A., Rawson, A., Benezech, T. (2023). Removal of biocontamination in the food industry using physical methods; an overview. *Food Control*, 148, Article 109645. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109645>
4. Duan, K., Onyeaka, H., Pang, G., Meng, Z. (2024). Pioneering food safety: Blockchain's integration in supply chain surveillance. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, Article 101281. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101281>
5. Anamul Hasan Chowdhury, M., Ashrafudoulla, Md., Isaie Ulrich Mevo, S., Mahamud, A. G. M. S. U., Sanat Anjum Reem, C., Jie-won Ha, A. et al. (2024). Efficacy of orange terpene against *Escherichia coli* biofilm on beef and food contact surfaces. *Food Research International*, 197, Article 115204. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.115204>
6. Abebe, G. M. (2020). The role of bacterial biofilm in antibiotic resistance and food contamination. *International Journal of Microbiology*, 2020(1), Article 1705814. <https://doi.org/10.1155/2020/1705814>
7. Verna, E., Genta, G., Galetto, M. (2025). Enhanced food quality by digital traceability in food processing industry. *Food Engineering Reviews*, 17(2), 359–383. <https://doi.org/10.1007/s12393-024-09392-4>
8. Khan, H., Jan, Z., Ullah, I., Alwabili, A., Alharbi, F., Habib, S. et al. (2024). A deep dive into AI integration and advanced nanobiosensor technologies for enhanced bacterial infection monitoring. *Nanotechnology Reviews*, 13(1), Article 20240056. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2024-0056>
9. Bhowmik, D., Rickard, J. J. S., Jelinek, R., Goldberg Oppenheimer, P. (2024). Resilient sustainable current and emerging technologies for foodborne pathogen detection. *Sustainable Food Technology*, 3(1), 10–31. <https://doi.org/10.1039/D4FB00192C>
10. Dhal, S. B., Kar, D. (2025). Leveraging artificial intelligence and advanced food processing techniques for enhanced food safety, quality, and security: A comprehensive review. *Discover Applied Sciences*, 7(1), Article 75. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06472-w>
11. Zhao, A., Sun, J., Liu, Y. (2023). Understanding bacterial biofilms: from definition to treatment strategies. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 13, Article 1137947. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2023.1137947>
12. David, A., Tahrioui, A., Tareau, A.-S., Forge, A., Gonzalez, M., Bouffartigues, E. et al. (2024). *Pseudomonas aeruginosa* biofilm lifecycle: Involvement of mechanical constraints and timeline of matrix production. *Antibiotics*, 13(8), Article 688. <https://doi.org/10.3390/antibiotics13080688>
13. Patra, S., Saha, S., Singh, R., Tomar, N., Gulati, P. (2025). Biofilm battleground: Unveiling the hidden challenges, current approaches and future perspectives in combating biofilm associated bacterial infections. *Microbial Pathogenesis*, 198, Article 107155. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2024.107155>
14. Elafify, M., Liao, X., Feng, J., Ahn, J., Ding, T. (2024). Biofilm formation in food industries: Challenges and control strategies for food safety. *Food Research International*, 190, Article 114650. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114650>
15. Juszczuk-Kubiak, E. (2024). Molecular aspects of the functioning of pathogenic bacteria biofilm based on quorum sensing (QS) signal-response system and innovative non-antibiotic strategies for their elimination. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(5), Article 2655. <https://doi.org/10.3390/ijms25052655>
16. Coppola, F., Fratianni, F., Bianco, V., Wang, Z., Pellegrini, M., Coppola, R. et al. (2025). New methodologies as opportunities in the study of bacterial biofilms, including food-related applications. *Microorganisms*, 13(5), Article 1062. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13051062>
17. Chowdhury, M. A. H., Sarkar, F., Reem, C. S. A., Rahman, S. M., Mahamud, A. G. M. S. U., Rahman, Md. A. et al. (2024). Enzyme applications in baking: From dough development to shelf-life extension. *International Journal of Biological Macromolecules*, 282(4), Article 137020. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137020>
18. Dawan, J., Zhang, S., Ahn, J. (2025). Recent advances in biofilm control technologies for the food industry. *Antibiotics*, 14(3), Article 254. <https://doi.org/10.3390/antibiotics14030254>
19. Anupama, A., Pattapulavar, V., Christopher, J. G. (2025). The past, present, future of *Listeria monocytogenes*: Understanding the molecular pathways, antibiotic resistance and public health implication. *Medicine in Microecology*, 25, Article 100127. <https://doi.org/10.1016/j.medmic.2025.100127>
20. Sri Vigna Hema, V., Manickavasagan, A. (2024). Blockchain implementation for food safety in supply chain: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 23(5), Article e70002. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70002>
21. Wahyuni, H. C., Rosid, M. A., Azara, R., Voak, A. (2024). Blockchain technology design based on food safety and halal risk analysis in the beef supply chain with FMEA-FTA. *Journal of Engineering Research*, 13(2), 590–595. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.02.002>
22. Herzog, D., Herzog, N. (2024). Blockchain technology and sanitary aspects of the water supply. *Archives of Case Reports: Open Access (ACROA)*, 1(1), 1–11. <https://doi.org/10.20944/preprints202403.1620.v1>
23. Oriekhoe, O. I., Ilugbusi, B. S., Adisa, O. (2024). Ensuring global food safety: Integrating blockchain technology into food supply chains. *Engineering Science and Technology Journal*, 5(3), 811–820. <https://doi.org/10.51594/estj.v5i3.905>
24. Mahunu, G. K., Osei-Kwarteng, M., Ogwu, M. C., Afoakwah, N. A. (2024). Safe food handling techniques to prevent microbial contamination. Chapter in a book: *Food Safety and Quality in the Global South*. Springer, 2024. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-2428-4\\_14](https://doi.org/10.1007/978-981-97-2428-4_14)
25. Radi Benjelloun, G., Chouhbi, O., Bahlaouan, B., Bennani, M., El Antri, S., Boutaleb, N. (2025). Biofilms in the food industry: Adhesion mechanisms, control strategies, and mastery. *Natural Built Social Environment Health*, 1(1), 41–80. <https://doi.org/10.63095/NBSEH.25.650223>
26. Fernández González, A., Badía Laíño, R., Costa-Fernández, J. M., Soldado, A. (2024). Progress and challenge of sensors for dairy food safety monitoring. *Sensors*, 24(5), Article 1383. <https://doi.org/10.3390/s24051383>
27. Brás, A., Braz, M., Martinho, I., Pereira, C., Almeida, A. (2024). Effect of bacteriophages against biofilms of *Escherichia coli* on food processing surfaces. *Microorganisms*, 12(2), Article 366. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12020366>
28. Ding, H., Tian, J., Yu, W., Wilson, D. I., Young, B. R., Cui, S. et al. (2023). The application of artificial intelligence and big data in the food industry. *Foods*, 12(24), Article 4511. <https://doi.org/10.3390/foods12244511>
29. Тутельян, А. В., Юшина, Ю. К., Соколова, О. В., Батаева, Д. С., Фесюн, А. Д., Датий, А. В. (2019). Образование биологических пленок микроорганизмов на пищевых производствах. *Вопросы питания*, 88(3), 32–43. [Tutelyan, A. V., Yushina, Yu. K., Sokolova, O. V., Bataeva, D. S., Fesyun, A. D., Datiy, A. V. (2019). Название по данным журнала: Formation of biological films by microorganisms in food productions. *Problems of Nutrition*, 88 (3), 32–43. (In Russian)] <https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10027>
30. Al-Sharify, Z. T., Al-Najjar, S. Z., Naser, Z. A., Alsherfy, Z. A., Onyeaka, H. (2025). The impact of fluid flow on microbial growth and distribution in food processing systems. *Foods*, 14(3), Article 401. <https://doi.org/10.3390/foods14030401>
31. Бурак, Л. Ч. (2024). Ограничения и возможности современных технологий обеспечения микробиологической безопасности пищевых продуктов. *Известия высших учебных заведений. Пищевая технология*, 2–3(396), 6–13. [Burak, L. Ch. (2024). Limitations and possibilities of modern technologies for ensuring microbiological safety of food products. *Izvestiya Vuzov. Food Technology*, 2–3(396), 6–13. (In Russian)] <https://doi.org/10.26297/0579-3009.2024.2-3.1>
32. Oh, H., Lee, J. (2024). Psychrotrophic bacteria threatening the safety of animal-derived foods: Characteristics, contamination, and control strategies. *Food Science of Animal Resources*, 44(5), 1011–1027. <https://doi.org/10.5851/kosfa.2024.e70>
33. Liu, M., Ding, Y., Ye, Q., Wu, S., Gu, Q., Chen, L. et al. (2024). Cold-tolerance mechanisms in foodborne pathogens: *Escherichia coli* and *Listeria monocytogenes* as examples. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 65(11), 2031–2045. <https://doi.org/10.1080/10408398.2024.2322141>
34. Jang, H., Lee, D., Yoon, B. (2024). Development of a blockchain-based food safety system for shared kitchens. *Systems*, 12(11), Article 509. <https://doi.org/10.3390/systems12110509>

35. Chhetri, K. B. (2024). Applications of artificial intelligence and machine learning in food quality control and safety assessment. *Food Engineering Reviews*, 16(1), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09363-1>
36. Sreevathsan, S., Bhavana, B. K., Debnath, S., Mudliar, S. N. (2023). Advanced computational tools for enhanced food quality and safety. Chapter in a book: *Engineering Aspects of Food Quality and Safety*. Springer, 2023. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-30683-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-30683-9_8)
37. Abouhaggar, A., Celiešiūtė-Germanienė, R., Bakute, N., Stirke, A., Melo, W. C. M. A. (2024). Electrochemical biosensors on microfluidic chips as promising tools to study microbial biofilms: A review. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 14, Article 1419570. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1419570>
38. Srivastav, A. K., Das, P., Srivastava, A. K. (2024). Precision agriculture and environmental monitoring. Chapter in a book: *Biotech and IoT*. Apress, 2024. [https://doi.org/10.1007/979-8-8688-0527-1\\_7](https://doi.org/10.1007/979-8-8688-0527-1_7)
39. Hooda, A., Vikranta, U., Duary, U. (2025). Principles of food dairy safety: Challenges and opportunities. Chapter in a book: *Engineering Solutions for Sustainable Food and Dairy Production*. Springer, 2025. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-75834-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-75834-8_2)
40. Bosona, T., Gebresenbet, G. (2023). The role of blockchain technology in promoting traceability systems in agri-food production and supply chains. *Sensors*, 23(11), Article 5342. <https://doi.org/10.3390/s23115342>
41. Chowdhury, M. A. H., Reem, C. S. A., Ashrafudoulla, Md., Rahman, Md. A., Shaila, S., Jie-won Ha, A. et al. (2025). Role of advanced cleaning and sanitation techniques in biofilm prevention on dairy equipment. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24(3), Article e70176. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70176>
42. Ayisi Larbi, C., Osei, S. A. (2024). Reduction of losses and wastage in seafoods: The role of smart tools and biosensors based on artificial intelligence. *Journal of AI*, 8(1), 14–44. <https://doi.org/10.61969/jai.1394542>
43. Flores-Iwasaki, M., Guadalupe, G. A., Pachas-Caycho, M., Chapa-Gonza, S., Mori-Zababurri, R. C., Guerrero-Abad, J. C. (2025). Internet of things (IoT) sensors for water quality monitoring in aquaculture systems: A systematic review and bibliometric analysis. *AgriEngineering*, 7(3), Article 78. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7030078>
44. Pham, C., Nguyen, T.-T., Adamopoulos, A., Tait, E. (2022). Blockchain-enabled traceability in sustainable food supply chains: A case study of the pork industry in Vietnam. Chapter in a book: *Information Systems Research in Vietnam: A Shared Vision and New Frontiers*. Springer, 2022. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-3804-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-19-3804-7_5)
45. Vu, T. T., Trinh, H. H. H. (2021). Blockchain technology for sustainable supply chains of agri-food in Vietnam: A SWOT analysis. *Science and Technology Development Journal: Economics-Law and Management*, 5(1), 1278–1289. <https://doi.org/10.32508/stdjelm.v5i1.675>
46. Бурак, Л. Ч., Ермошина, Т. В., Саманкова, Н. В. (2025). Устойчивое производство. Концепция качества 4.0. *Фундаментальные исследования*, 9, 81–90. [Burak, L. Ch., Ermoshina, T. V., Samankova, N. V. (2025). Sustainable production. Quality concept 4.0. *Fundamental Research*, 9, 81–90. (In Russian)] <https://doi.org/10.17513/fr.43905>
47. Hussain, M., Zou, J., Zhang, H., Zhang, R., Chen, Z., Tang, Y. (2022). Recent progress in spectroscopic methods for the detection of foodborne pathogenic bacteria. *Biosensors*, 12(10), Article 869. <https://doi.org/10.3390/bios12100869>
48. Cheng, M.-F., Mukundan, A., Karmakar, R., Valappil, M. A. E., Jouhar, J., Wang, H.-C. (2025). Modern trends and recent applications of hyperspectral imaging: A review. *Technologies*, 13(5), Article 170. <https://doi.org/10.3390/technologies13050170>
49. Xie, J., Qu, S., Xu, M. (2024). Mapping water scarcity risks in global supply chain networks. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 27(12), 2541–2555. <https://doi.org/10.1080/13675567.2024.2330591>
50. Unger, P., Sekhon, A. S., Chen, X., Michael, M. (2022). Developing an affordable hyperspectral imaging system for rapid identification of *Escherichia coli* O157: H7 and *Listeria monocytogenes* in dairy products. *Food Science and Nutrition*, 10(4), 1175–1183. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2749>
51. Aly, S. M., Fathi, M. (2024). Advancing aquaculture biosecurity: A scientometric analysis and future outlook for disease prevention and environmental sustainability. *Aquaculture International*, 32(7), 8763–8789. <https://doi.org/10.1007/s10499-024-01589-y>
52. Fouda, A., Abdel-Rahman, M. A., Eid, A. M., Selim, S., Ejaz, H., Alruwaili, M. et al. (2024). Investigating the potential of green-fabricated zinc oxide nanoparticles to inhibit the foodborne pathogenic bacteria isolated from spoiled fruits. *Catalysts*, 14(7), Article 427. <https://doi.org/10.3390/catal14070427>
53. Falkovskaya, A., Gowen, A. (2020). Literature review: Spectral imaging applied to poultry products. *Poultry Science*, 99(7), 3709–3722. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.04.013>
54. Fagbemi, O. A., Essuah, M., Ugwu, D. C., Ajibola, A. B., Julius, S. O., Onyeyili, I. N. et al. (2025). Nanobiotechnology-driven innovations for tackling antimicrobial resistance. *World Journal of Biology Pharmacy and Health Sciences*, 21(2), 300–328. <https://doi.org/10.30574/wjbphs.2025.21.2.0093>
55. Arthur, M., Afari, E. L., Alexa, E.-A., Zhu, M.-J., Gaffney, M. T., Celayeta, J. M. F. et al. (2025). Recent advances in examining the factors influencing the efficacy of bioicides against *Listeria monocytogenes* biofilms in the food industry: A systematic review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24(1), Article e70083. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70083>
56. Rugji, J., Erol, Z., Taşçı, F., Musa, L., Hamadani, A., Gündemir, M. G. et al. (2024). Utilization of AI – reshaping the future of food safety, agriculture, and food security – a critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 65(26), 5136–5180. <https://doi.org/10.1080/10408398.2024.2430749>
57. Zhang, J., Huang, H., Song, G., Huang, K., Luo, Y., Liu, Q. et al. (2022). Intelligent biosensing strategies for rapid detection in food safety: A review. *Biosensors and Bioelectronics*, 202, Article 114003. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114003>
58. Singh, P., Pandey, V. K., Singh, R., Negi, P., Maurya, S. N., Rustagi, S. (2025). Substantial enhancement of overall efficiency and effectiveness of the pasteurization and packaging process using artificial intelligence in the food industry. *Food and Bioprocess Technology*, 18(2), 1125–1140. <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03527-5>
59. Neethirajan, S. (2024). Net zero dairy farming – Advancing climate goals with big data and artificial intelligence. *Climate*, 12(2), Article 15. <https://doi.org/10.3390/cli12020015>
60. Evans, E. W., Bulochova, V., Jayal, A., Haven-Tang, C. (2023). Attitudes towards using artificial intelligence to determine real-time hand hygiene compliance in the food sector. *Food Control*, 145, Article 109439. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109439>
61. Naseem, S., Rizwan, M. (2025). The role of artificial intelligence in advancing food safety: A strategic path to zero contamination. *Food Control*, 175, Article 111292. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111292>
62. Dharmarathne, G., Abekoon, A. M. S. R., Bogahawaththa, M., Alawatugoda, J., Meddage, D. P. P. (2025). A review of machine learning and Internet-of-Things on the water quality assessment: Methods, applications, and future trends. *Results in Engineering*, 26, Article 105182. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105182>
63. Das, P., Nath, N. K., Kumar, N. K., Mishra, L. R., Suryawanshi, S., Gautam, V. K. (2024). Future of water management in India: Emerging role of IoT, AI, and data analytics. Chapter in a book: *Integrated Management of Water Resources in India: A Computational Approach*. Water Science and Technology Library. Springer, 2024. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-62079-9\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-031-62079-9_22)
64. Radhika, K., Mohammed, S., Tadepalli, S. K., Puvvula, K. (2024). Food supply chain management by leveraging AI, IoT, and blockchain technologies. Chapter in a book: *The Future of Agriculture: IoT, AI and Blockchain Technology for Sustainable Farming*. Bentham Science Publishers, 2024. <https://doi.org/10.2174/97898152743491240101>
65. Bhagavan, S., Gharibi, M., Rao, P. (December 15–18, 2021). *Fedsmartem: Secure federated matrix factorization using smart contracts for multi-cloud supply chain*. 2021 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). IEEE, 2021. <https://doi.org/10.1109/BigData52589.2021.9671789>
66. Ashoka, P., Devi, B. R., Sharma, N., Behera, M., Gautam, A., Jha, A. et al. (2024). Artificial intelligence in water management for sustainable farming: A review. *Journal of Scientific Research and Reports*, 30(6), 511–525. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i62068>
67. Reem, C. S. A., Chowdhury, M. A. H., Ashrafudoulla, M., Ha, S.-D. (2025). Leveraging blockchain and AI for biofilm control in food processing environments. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24(5), Article e70261. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.70261>
68. Dakhia, Z., Russo, M., Merenda, M. (2025). AI-enabled IoT for food computing: Challenges, opportunities, and future direction. *Sensors*, 25(7), Article 2147. <https://doi.org/10.3390/s25072147>
69. Kumari, A., Gaikwad, K. K. (2025). Data carriers for real-time tracking and monitoring in smart, intelligent packaging applications: A technological review. *Next Materials*, 8, Article 100591. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.100591>
70. Cruz, E., Hidalgo-Rodriguez, M., Acosta-Reyes, M., Rangel, J. C., Boniche, K., Gonzalez-Olivardia, F. (2025). ACSMPT: Automated counting and monitoring system for poultry tracking. *AgriEngineering*, 7(3), Article 86. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7030086>
71. Sobhan, A., Hossain, A., Wei, L., Muthukumarappan, K., Ahmed, M. (2025). IoT-enabled biosensors in food packaging: A breakthrough in food safety for monitoring risks in real time. *Foods*, 14(8), Article 1403. <https://doi.org/10.3390/foods14081403>
72. Jin, G., Jiang, Z., Sun, Y., Liu, S., Wu, F. (2025). Intelligent clean-in-place (CIP) system in beverage (healthy water) cleaner production. *Food Control*, 168, Article 110877. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110877>
73. Neethirajan, S. (2025). Safeguarding digital livestock farming: A comprehensive cybersecurity roadmap for dairy and poultry industries. *Frontiers in Big Data*, 8, Article 1556157. <https://doi.org/10.3389/fdata.2025.1556157>
74. Yin, B., Tan, G., Muhammad, R., Liu, J., Bi, J. (2025). AI-powered innovations in food safety from farm to fork. *Foods*, 14(11), Article 1973. <https://doi.org/10.3390/foods14111973>
75. Nashruddin, S. N. A. B. M., Salleh, F. H. M., Yunus, R. M., Zaman, R. (2024). Artificial intelligence-powered electrochemical sensor: Recent advances, challenges, and prospects. *Heliyon*, 10(18), Article e37964. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37964>
76. Ameer, S., Ibrahim, H., Yaseen, M. U., Kulsoom, F., Sher, M. (2023). Electrochemical impedance spectroscopy-based sensing of biofilms: A comprehensive review. *Biosensors*, 13(8), Article 777. <https://doi.org/10.3390/bios13080777>
77. Narayanasamy, D., Taufik, S., Mohd Azmi, A. F., Mohd Nor, S. A., Abdul Rashid, J. I. (2024). Modern technology advances of *Pseudomonas aeruginosa* based biosensor approach. *Biosensors and Bioelectronics*, 17, Article 100441. <https://doi.org/10.1016/j.biosx.2024.100441>
78. Hemdan, M., Abuelhaded, K., Shaker, A. A. S., Ashour, M. M., Abdelaziz, M. M., Dahab, M. I. et al. (2025). Recent advances in nano-enhanced biosensors: Innovations in design, applications in healthcare, environmental monitoring, and food safety, and emerging research challenges. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 48, Article 100783. <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2025.100783>
79. Oh, S. E., Kim, J.-H., Kim, J.-Y., Ahn, J.-H. (2025). Food safety distribution systems using private blockchain: Ensuring traceability and data integrity verification. *Foods*, 14(8), Article 1405. <https://doi.org/10.3390/foods14081405>
80. Бурак, Л. Ч. (2023). Обзор разработок биоразлагаемых упаковочных материалов для пищевой промышленности. *Ползуновский вестник*, 1, 91–105. [Burak, L. Ch. (2023). Overview of developments of biodegradable packaging materials for the food industry. *Polzunovsky Vestnik*, 1, 91–105. (In Russian)] <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.012>
81. Бурак, Л. Ч., Сапач, А. Н., Писарик, М. И. (2023). Интеллектуальная упаковка для овощей и фруктов, классификация и перспективы использования: Обзор предметного поля. *Health, Food and Biotechnology*, 5(1), 51–80. [Burak, L. Ch., Sapach, A. N., Pisarik M. I. (2023). Intelligent packaging for vegetables and fruits, classification and use prospects: Scoping review. *Health, Food and Biotechnology*, 5(1), 51–80. (In Russian)] <https://doi.org/10.36107/hfb.2023.i1.s165>
82. Periyasamy, T., Asrafali, S. P., Lee, J. (2025). Recent advances in functional biopolymer films with antimicrobial and antioxidant properties for enhanced food packaging. *Polymers*, 17(9), Article 1257. <https://doi.org/10.3390/polym17091257>

83. Duan, K., Onyeaka, H., Pang, G. (2024). Leveraging blockchain to tackle food fraud: Innovations and obstacles. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, Article 101429. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101429>

84. Kremer, T., Murray, N., Buckley, J., Rowan, N. J. (2023). Use of real-time immersive digital training and educational technologies to improve patient safety during the processing of reusable medical devices: Quo vadis? *Science of the Total Environment*, 900, Article 165673. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165673>

85. Highmore, C., Cooper, K., Parker, J., Robinson, J., Webb, J. S. (2025). Real-time detection of foodborne pathogens and biofilm in the food processing environment with Bactiscan, a macro-scale fluorescence device. *Journal of Food Protection*, 88(6), Article 100511. <https://doi.org/10.1016/j.jfp.2025.100511>

86. Roberts, S. C. H., Havill, N. L., Flores, R. M., Hendrix II, C. A., Williams, M. J., Feinn, R. S. et al. (2022). Disinfection of virtual reality devices in health care settings: In vitro assessment and survey study. *Journal of Medical Internet Research*, 24(12), Article e42332. <https://doi.org/10.2196/42332>

87. Hamilton, A. N., Gibson, K. E., Amalaradjou, M. A., Callahan, C. W., Millner, P. D., Ilic, S. et al. (2023). Cultivating food safety together: Insights about the future of produce safety in the U.S. controlled environment agriculture sector. *Journal of Food Protection*, 86(12), Article 100190. <https://doi.org/10.1016/j.jfp.2023.100190>

88. Yeganeh, L. N., Fenty, N. S., Chen, N. S., Simpson, A., Hatami, M. (2025). The future of education: A multi-layered metaverse classroom model for immersive and inclusive learning. *Future Internet*, 17(2), Article 63. <https://doi.org/10.3390/fi17020063>

89. Pizzi, F., Peters, F., Sorribes, E., Marín-Beltrán, I., Romera-Castillo, C., Grau, J. et al. (2025). Modulation of biofilm growth by shear and fluctuations in turbulent environments. *Scientific Reports*, 15(1), Article 12460. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95822-0>

90. Xue, R., Wang, Z., Li, G., Hall, P., Watson, N. J. (2025). Clean-in-place optimization using swirl pipe and ultrasonic monitoring. *Journal of Food Engineering*, 396, Article 112572. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2025.112572>

91. Jafarzadeh, S., Yildiz, Z., Yildiz, P., Strachowski, P., Forough, M., Esmaeili, Y. et al. (2024). Advanced technologies in biodegradable packaging using intelligent sensing to fight food waste. *International Journal of Biological Macromolecules*, 261, Article 129647. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129647>

92. Ziani, I., Bouakline, H., El Guerraf, A., Marie-Laure Fauconnier, Sher, F. (2025). Integrating AI and advanced spectroscopic techniques for precision food safety and quality control. *Trends in Food Science and Technology*, 156, Article 104850. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104850>

93. Huang, Y., Guo, X., Wu, Y., Chen, X., Feng, L., Xie, N. et al. (2024). Nanotechnology's frontier in combatting infectious and inflammatory diseases: Prevention and treatment. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 9(1), Article 34. <https://doi.org/10.1038/s41392-024-01745-z>

94. Apoorva, S., Nguyen, N. T., Sreejith, K. R. (2024). Recent developments and future perspectives of microfluidics and smart technologies in wearable devices. *Lab on a Chip*, 24(7), 1833–1866. <https://doi.org/10.1039/D4LC00089G>

95. Kolikipogu, R., Shivaputra, E., Muniyandy, E., Maroor, J. P., Lakshmi, G. V. R., Konduri, B. et al. (2025). Improving food safety by IoT-based climate monitoring and control systems for food processing plants. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, 8(2), 387–399. <https://doi.org/10.1007/s41976-024-00190-4>

96. Roussaki, I., Doolin, K., Skarmeta, A., Routis, G., Lopez-Morales, J. A., Claffey, E. et al. (2023). Building an interoperable space for smart agriculture. *Digital Communications and Networks*, 9(1), 183–193. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.02.004>

97. Mohd Jais, N. A., Abdullah, A. F., Mohd Kassim, M. S., Abd Karim, M. M., Muhadi, N. A. (2024). Improved accuracy in IoT-based water quality monitoring for aquaculture tanks using low-cost sensors: Asian seabass fish farming. *Heliyon*, 10(8), Article e29022. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29022>

98. Vedantam, K. S., Jain, S. K., Panwar, N. L., Sunil, J., Wadhawan, N., Kumar, A. (2024). Emergence of Internet of Things technology in food and agricultural sector: A review. *Journal of Food Process Engineering*, 47(8), Article e14698. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14698>

99. Sunmola, F., Baryannis, G., Tan, A., Co, K., Papadakis, E. (2025). Holistic framework for blockchain-based halal compliance in supply chains enabled by artificial intelligence. *Systems*, 13(1), Article 21. <https://doi.org/10.3390/systems13010021>

| СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | AUTHOR INFORMATION                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Принадлежность к организации</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <b>Affiliation</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Бурак Леонид Чеславович</b> — доктор философии в области пищевых наук, кандидат технических наук, директор, Общество с ограниченной ответственностью «БЕЛРОСАКВА»<br>220118, Республика Беларусь, Минск, ул. Шаранговича, 19, офис 718<br>E-mail: leonidburak@gmail.com<br>ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-6613-439X">https://orcid.org/0000-0002-6613-439X</a><br>* автор для контактов                                                                         | <b>Leonid Ch. Burak</b> , PhD, Candidate of Technical Sciences, Director, BELROSAKVA Limited Liability Company<br>19, Sharangovich Str., Minsk, 220018, Republic of Belarus<br>E-mail: leonidburak@gmail.com<br>ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-6613-439X">https://orcid.org/0000-0002-6613-439X</a><br>* corresponding author                                                                                                                           |
| <b>Завалей Андрей Петрович</b> — начальник испытательной лаборатории, Совместное общество с ограниченной ответственностью «Ароматик»<br>222112, Республика Беларусь, Минская область, Дзержинск, ул. Колхозная, 1<br>E-mail: zavaley@gmail.com<br>ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-6565-5927">https://orcid.org/0000-0002-6565-5927</a>                                                                                                                              | <b>Andrey P. Zavaley</b> , Head of Testing Laboratory, Joint Limited Liability Vompny “Aromatic”<br>1, Kolkhoznaya Str., Dzherzhinsk, Minsk Region, 222112, Republic of Belarus<br>E-mail: zavaley@gmail.com<br>ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-6565-5927">https://orcid.org/0000-0002-6565-5927</a>                                                                                                                                                     |
| <b>Сапач Александр Николаевич</b> — заместитель директора, Общество с ограниченной ответственностью «БЕЛРОСАКВА»<br>220118, Республика Беларусь, Минск, ул. Шаранговича, 19, офис 718<br>E-mail: aleksandr@belrosakva.by<br>ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-8579-2689">https://orcid.org/0000-0002-8579-2689</a>                                                                                                                                                    | <b>Alexander N. Sapach</b> , Deputy Director, BELROSAKVA Limited Liability Company<br>19, Sharangovich Str., Minsk, 220018, Republic of Belarus<br>E-mail: aleksandr@belrosakva.by<br>ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-8579-2689">https://orcid.org/0000-0002-8579-2689</a>                                                                                                                                                                               |
| <b>Критерии авторства</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>Contribution</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Бурак Л. Ч.:</b> концептуализация, разработка методологии исследования, научное руководство исследованием, проведение исследования, написание-рецензирование и редактирование рукописи;<br><b>Завалей А. П.:</b> проведение исследования, работа с программным обеспечением, проверка данных, написание и редактирование рукописи;<br><b>Сапач А. Н.:</b> анализ литературных источников по теме исследования, проведение исследования, написание и редактирование рукописи. | <b>Leonid Ch. Burak:</b> conceptualization, development of research methodology, scientific supervision of the research, conducting the research, writing and reviewing, manuscript editing;<br><b>Andrey P. Zavaley:</b> conducting research, working with software, checking data, writing and editing the manuscript;<br><b>Alexander N. Sapach:</b> analysis of literary sources on the research topic, conducting research, writing and editing the manuscript. |
| <b>Конфликт интересов</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>Conflict of interest</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | The authors declare no conflict of interest.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |