

Научная статья
УДК 004.724.4<https://doi.org/10.37493/2307-910X.2026.1.2>

Роль беспроводных сенсорных сетей в повышении эффективности агропромышленного комплекса: систематический обзор

Владимир Валерьевич Самойленко^{1*}

¹ Ставропольский государственный аграрный университет (д. 12, пер. Зоотехнический, Ставрополь, 355000, Россия)

¹ samoilenko.vv@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4703-9642>

*Автор, ответственный за переписку

Аннотация. Введение. Современный агропромышленный комплекс (АПК) сталкивается с вызовами, требующими перехода к прецизионным, ресурсосберегающим и адаптивным методам управления. Беспроводные сенсорные сети (БСС) рассматриваются как ключевая технологическая основа для цифровизации АПК. Однако, в литературе сохраняется пробел, связанный с отсутствием системного анализа интеграционного потенциала БСС и их комплексного влияния на операционную, экономическую и экологическую эффективность АПК на всех этапах цепочки создания стоимости.

Цель. Комплексный анализ роли БСС в повышении операционной, экономической и экологической эффективности АПК, а также выявление ключевых технологических трендов, барьеров внедрения и перспективных направлений будущих исследований. **Материалы и методы.** Проведен систематический обзор литературы в соответствии с руководством PRISMA. Поиск релевантных публикаций за период 2021–2026 гг. осуществлен в базе данных Scopus с использованием заданной стратегии. Отбор исследований проводился по критериям PICOS, с фокусировкой на эмпирические работы, посвященные применению БСС в различных отраслях АПК. Для анализа использовались методы качественного тематического синтеза, библиометрической визуализации (VOSviewer) и критической оценки качества исследований. **Результаты и обсуждение.** Определено пять ключевых тематических кластеров исследований, подтверждающих их междисциплинарный характер. Установлено, что БСС оказывают значимое положительное влияние на ключевые показатели эффективности АПК, такие как повышение урожайности до 43%, экономию воды до 50% и удобрений до 32%, снижение энергопотребления до 50%. Технологическая составляющая БСС эволюционирует в сторону гибридных облачно-периферийных архитектур с интеграцией искусственного интеллекта. Произведенный анализ барьеров, препятствующих активному применению данной технологии в АПК. **Заключение.** БСС являются технологическим ядром для построения эффективного и устойчивого агропромышленного комплекса. Проведенный обзор систематизирует доказательства их положительного воздействия на КРП и выделяет архитектурные и интеграционные тренды. Для полной реализации потенциала БСС необходимы дальнейшие междисциплинарные исследования, направленные на преодоление технических и экономических барьеров, разработку стандартов и создание адаптивных решений, учитывающих локальные условия.

Ключевые слова: Беспроводные сенсорные сети (БСС), агропромышленный комплекс (АПК), «умное» сельское хозяйство (Smart Agriculture), Интернет вещей (IoT), ключевые показатели эффективности (КРП), прецизионное земледелие, энергоэффективность, систематический обзор, периферийные вычисления (Edge Computing), машинное обучение / искусственный интеллект (ИИ), протоколы LPWAN (LoRaWAN, NB-IoT), цифровизация сельского хозяйства, оптимизация ресурсов (вода, удобрения), устойчивое развитие, автономные системы.

Для цитирования: Самойленко В. В. Роль беспроводных сенсорных сетей в повышении эффективности агропромышленного комплекса: систематический обзор // Современная наука и инновации. 2026. № 1. С. 25–45. <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2026.1.2>

Финансирование: Настоящая статья подготовлена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2025-591) в рамках реализации мероприятий программы развития научного центра мирового уровня «Агроинженерия будущего» Ставропольского ГАУ, утверждённой протоколом заседания президиума Комиссии по научно-технологическому развитию Российской Федерации от 29 мая 2025 года № 3.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 21.01.2026;
одобрена после рецензирования 01.02.2026;
принята к публикации 01.03.2026.

Research article

The role of wireless sensor networks in improving the efficiency of the agro-industrial complex: a systematic review

Vladimir V. Samoylenko^{1*}

¹ Stavropol State Agrarian University (12, Zootekhnichesky ave., Stavropol, 355000, Russia)

¹ samoilenko.vv@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4703-9642>

*Corresponding author

Abstract. Introduction. The modern agro-industrial complex faces challenges that require a transition to precision, resource-saving, and adaptive management methods. Wireless sensor networks are considered a key technological foundation for the digitalization of the agro-industrial complex. However, a gap persists in the literature regarding the lack of a systematic analysis of the integration potential of WSNs and their comprehensive impact on the operational, economic, and environmental efficiency of the agro-industrial complex at all stages of the value chain. **Goal.** The aim of this systematic review is a comprehensive analysis of the role of WSNs in improving the operational, economic, and environmental efficiency of the agro-industrial complex, as well as identifying key technological trends, implementation barriers, and promising directions for future research. **Materials and methods.** A systematic literature review was conducted in accordance with the PRISMA guidelines. The search for relevant publications for the period 2021–2026 was performed in the Scopus database using a defined search strategy. Study selection was carried out according to PICOS criteria, focusing on empirical works dedicated to the application of WSNs in various sectors of the agro-industrial complex. For the analysis, methods of qualitative thematic synthesis, bibliometric visualization (VOSviewer), and critical assessment of study quality were used. **Results and discussion.** Five key thematic research clusters were identified, confirming their interdisciplinary nature. It was established that WSNs have a significant positive impact on the key performance indicators of the agro-industrial complex, such as increasing yield by up to 43%, saving water by up to 50% and fertilizers by up to 32%, and reducing energy consumption by up to 50%. The technological component of WSNs is evolving towards hybrid cloud-edge architectures with artificial intelligence integration. An analysis of barriers hindering the active application of this technology in the agro-industrial complex was performed. **Conclusion.** WSNs are the technological core for building an efficient and sustainable agro-industrial complex. This review systematizes evidence of their positive impact on KPIs and highlights architectural and integration trends. For the full realization of WSNs' potential, further interdisciplinary research is needed, aimed at overcoming technical and economic barriers, developing standards, and creating adaptive solutions that consider local conditions.

Keywords: wireless sensor networks (WSN), agro-industrial complex, smart agriculture, Internet of Things (IoT), key performance indicators (KPI), precision farming, energy efficiency, systematic review, edge computing, machine learning / artificial intelligence (AI), LPWAN protocols (LoRaWAN, NB-IoT), digitalization of agriculture, resource optimization (water, fertilizers), sustainable development, autonomous systems.

For citation: Samoylenko VV. The role of wireless sensor networks in improving the efficiency of the agro-industrial complex: a systematic review. *Modern Science and Innovations*. 2026;(1):25-45. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2026.1.2>

Funding: This article was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (agreement No. 075-15-2025-591) as part of the implementation of the activities of the program for the development of the world-class scientific center "Agroengineering of the Future" in Stavropol State Agrarian University, approved by the meeting protocol of the Presidium of the Commission for Scientific and Technological Development in the Russian Federation dated May 29, 2025. No. 3.

Conflict of interest: the author declares no conflicts of interests.

The article was submitted 21.01.2026;
approved after reviewing 01.02.2026;
accepted for publication 01.03.2026.

Введение. Современный агропромышленный комплекс (АПК) сталкивается с рядом глобальных вызовов, среди которых можно отметить необходимость устойчивого увеличения производства продовольствия, оптимизация использования ограниченных ресурсов (воды, энергии, удобрений) и адаптация к изменяющимся климатическим условиям [1]. Традиционные методы управления объектами АПК, основанные на эмпирическом опыте и усредненных данных, зачастую не могут обеспечить требуемую точность и оперативность принятия решений. В этом контексте цифровизация сельского хозяйства на основе интернета вещей (IoT) становится ключевым фактором повышения его эффективности и конкурентоспособности. Одной из наиболее перспективных технологий для реализации концепции «умного» сельского хозяйства (Smart Agriculture) являются беспроводные сенсорные сети (БСС), которые представляют измерительно-телекоммуникационный базис IoT [2].

БСС представляет собой распределенную сеть автономных, миниатюрных электронных устройств (сенсорных узлов) [3], объединённых по беспроводному каналу связи для совместного мониторинга параметров на заданной территории (к примеру: поле, теплица, ферма, сад, хранилище) и передачи данных на центральный узел (шлюз) для последующей обработки, анализа и принятия управленческих решений.

Типичная архитектура БСС в АПК имеет трехуровневую иерархическую структуру [4]:

первый уровень включает в себя сенсорное поле, состоящее из множества развернутых узлов стационарного (в почве, на шпалерах) или мобильного (на роботах, животных, дронах) исполнения. Основной их задачей является непрерывный или периодический сбор данных [1].

второй уровень представляет собой сеть передачи данных, где для связи между узлами и шлюзом применяются энергоэффективные протоколы дальней связи (LPWAN - Low-Power Wide-Area Network), такие как LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) [5] и NB-IoT (Narrow Band Internet of Things) [6], часто с использованием многоскачковой (multi-hop) маршрутизации для увеличения радиуса покрытия.

третий уровень представляет собой шлюз (Gateway), который выступает интерфейсом между БСС и внешними системами: он агрегирует, производит предобработку данных и передаёт их в облако или на локальный сервер через широкополосные каналы (Ethernet, 4G/5G, Wi-Fi) для дальнейшего анализа и управления.

Несмотря на растущий объем научных публикаций, посвященных применению БСС в АПК, основная часть исследовательского внимания сосредоточена на анализе их технических характеристик (энергоэффективности протоколов, пропускной способности, срока службы узлов) или на решении узконаправленных агротехнических задач (автоматизация капельного орошения, локальный мониторинг состояния почвы). Подобные исследования безусловно вносят вклад в развитие технологии, однако представленная фрагментарность не позволяет оценить совокупное влияние БСС на агропромышленный комплекс как целостную систему. Таким образом, в литературе сохраняется существенный пробел: отсутствует комплексный, системный анализ роли БСС в повышении эффективности на всех ключевых этапах цепочки создания стоимости АПК от прецизионного производства

и контроля условий хранения до логистики и управления ресурсами. Настоящий обзор призван восполнить этот пробел, сместив фокус с отдельно рассматриваемых технических решений на оценку их интеграционного потенциала и конечного вклада в операционную, экономическую и экологическую эффективность всего агросектора. Для устранения данного пробела предлагаются исследования по систематическому обзору научной литературы для анализа и обобщения роли БСС в повышении операционной, экономической и экологической эффективности АПК. Проводя декомпозицию поставленной цели, можно представить следующие задачи исследования:

1. Классификация направлений применения БСС в АПК.

2. Анализ влияния БСС на ключевые показатели эффективности (KPI): урожайность, ресурсопотребление (вода, энергия, удобрения), рентабельность.

3. Анализ применяемой архитектуры, протоколов связи и типов данных.

4. Систематизация технологических вызовов и барьеров внедрения.

5. Определение перспективных направлений будущих исследований.

Материалы и методы исследований. Настоящий систематический обзор был проведен в соответствии с рекомендациями международного руководства PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), который включает сбор, критическую оценку и синтез существующих научных данных о роли БСС в повышении операционной, экономической и экологической эффективности АПК [7].

1. Методика сбора данных для проведения исследования.

1.1. Критерии отбора (Eligibility Criteria).

Для обеспечения методической строгости и четкости фокуса обзора была применена методология PICOS (**P**opulation, **I**ntervention, **C**omparison, **O**utcomes, **S**tudy design) [8]:

- **P (Population/Контекст):** агропромышленный комплекс, включая растениеводство (открытый грунт, теплицы), животноводство, аквакультуру, а также этапы хранения и транспортировки сельхозпродукции.

- **I (Intervention/Технология):** применение БСС или IoT-систем на их основе для мониторинга, контроля и автоматизации процессов.

- **C (Comparison/Сравнение):** (i) сравнение с традиционными, не автоматизированными методами ведения хозяйства; (ii) сравнение различных архитектур, протоколов или конфигураций БСС между собой (в рамках анализа эффективности самой технологии).

- **O (Outcomes/Результаты):** ключевые показатели эффективности (KPI), такие как: изменение урожайности, экономия ресурсов (воды, энергии и удобрений), снижение трудозатрат, повышение качества продукции, рентабельность, данные о надежности и энергопотреблении самой сенсорной сети.

- **S (Study design/Типы исследований):** эмпирические исследования, пилотные проекты, case studies, экспериментальные работы, опубликованные в рецензируемых журналах и материалах конференций.

Критерии включения [7]:

1. Публикации на английском или русском языках.

2. Период публикации: 2021–2026 гг. (фокус на современных технологиях).

3. Наличие эмпирических данных или детального технико-экономического анализа применения БСС в контексте АПК.

4. Описание архитектуры БСС, типов датчиков или измеряемых параметров.

Критерии исключения [7]:

1. Теоретические статьи, посвященные исключительно моделированию протоколов связи без привязки к конкретной сельскохозяйственной задаче.

2. Патенты, диссертации, тезисы, отчеты, книги.

3. Исследования, в которых беспроводная связь не является ключевым компонентом системы (например, системы на проводных датчиках).

4. Публикации с недоступным полным текстом.

1.2. Стратегия поиска (Search Strategy).

Поиск литературы проводился в феврале 2026 года в международной электронной научной базе **Scopus**. Была разработана комплексная строка поиска с использованием булевых операторов и усечений для охвата ключевых понятий с 2021 по 2026 гг. Базовая структура запроса представлена ниже:

```
TITLE-ABS-KEY ("wireless sensor network*" OR wsn OR "internet of things" OR
iot ) AND ( agricultur* OR farm* OR "precision agricultur*" OR "smart farm*" OR
greenhouse* OR livestock OR horticultur* ) AND ( efficien* OR yield OR "water
sav*" OR "energy sav*" OR "resource manag*" OR monitor* OR control* OR automati*
) ) AND PUBYEAR > 2020 AND PUBYEAR < 2027
```

Дополнительно был проведен **ручной поиск** по спискам литературы ключевых статей для выявления потенциально релевантных публикаций, пропущенных автоматическим поиском.

1.3. Процесс отбора исследований (The Study Selection Process).

Процесс состоял из четырех этапов (рисунок 1):

1. **Идентификация:** Сбор всех записей из баз данных, удаление дубликатов с помощью ПО Zotero и ручной проверки.

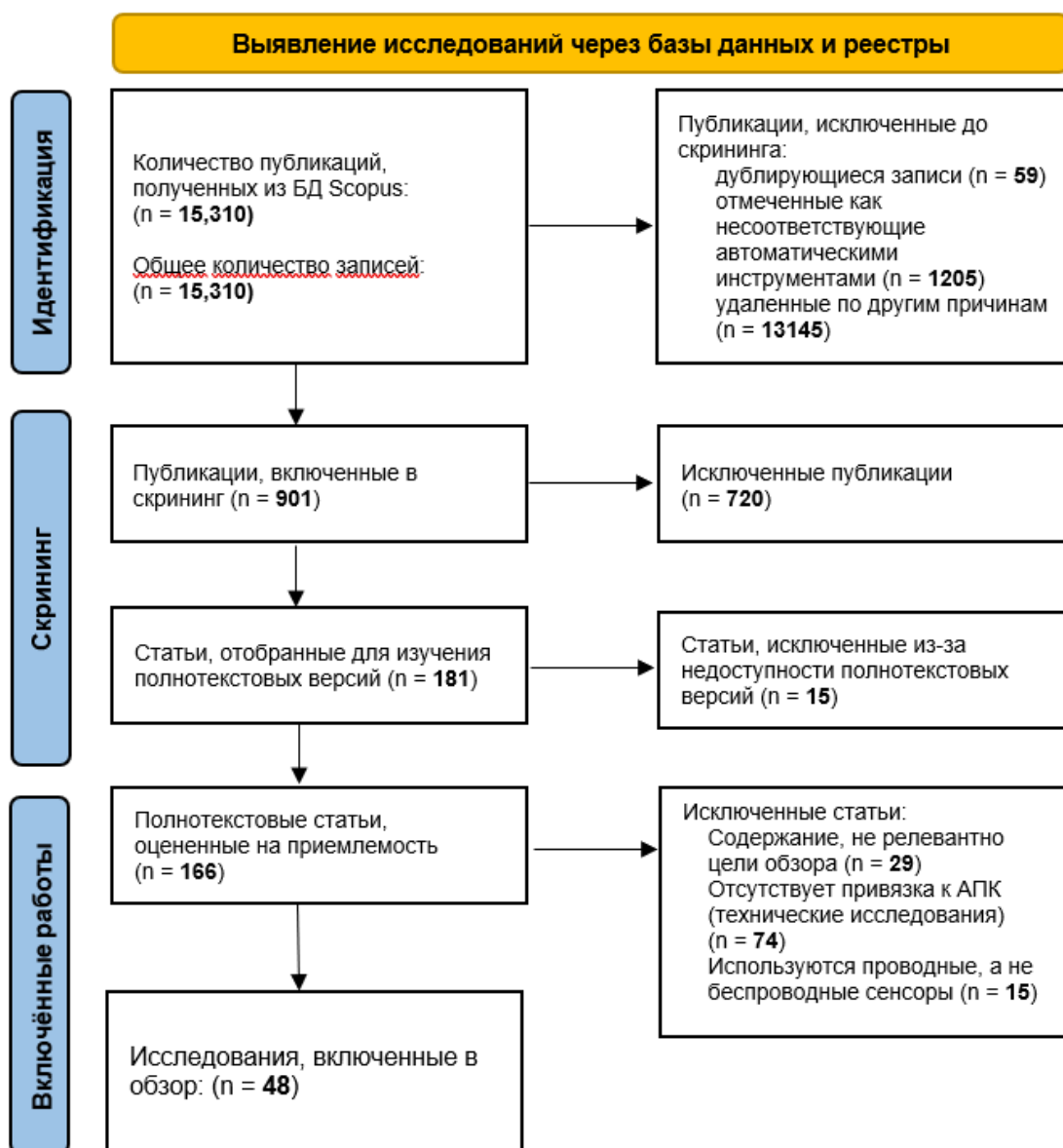


Рисунок 1. Блок схема PRISMA/
Figure 1. PRISMA block diagram

2. **Скрининг:** Первичная оценка релевантности по **заголовкам и аннотациям** на соответствие критериям включения/исключения. Детальный анализ **полных текстов** оставшихся статей для окончательного решения об их включении в обзор.

3. **Включение:** Формирование итогового списка исследований для качественного синтеза.

Процесс отбора визуализирован с помощью **блок-схемы PRISMA**, которая отображает количество статей на каждом этапе и причины исключения.

1.4. Извлечение и анализ данных (*Data Extraction and Synthesis*).

Для каждого включенного исследования данные извлекались в стандартизированную таблицу (data extraction form), включающую следующие поля:

- **Идентификаторы:** автор(ы), год публикации, источник.
- **Характеристики исследования:** цель, локация, тип объекта АПК (поле, теплица, ферма и т.д.).
- **Технические характеристики БСС:** архитектура сети, типы датчиков, протоколы связи, платформа (к примеру: Arduino, Raspberry Pi), источник питания.
- **Решаемая задача:** контроль микроклимата, мониторинг почвы, управление поливом, отслеживание скота и др.
- **Ключевые результаты:** количественные и качественные данные о влиянии на эффективность АПК (значения KPI).
- **Выводы и ограничения:** основные заключения авторов и указанные ими проблемы.

Ввиду значительной гетерогенности измеряемых параметров, технологических решений и условий проведения исследований, количественный мета-анализ был признан неподходящим. Поэтому был проведен **качественный тематический синтез (narrative synthesis)**. Данные были структурированы по ключевым темам (области применения, технические решения, влияние на эффективность, вызовы), обобщены и представлены в виде текстового описания, сравнительных таблиц.

1.5. Оценка качества исследований (*Quality Assessment*).

Для критической оценки методологического качества включенных эмпирических исследований был адаптирован **чек-лист на основе критериев Joanna Briggs Institute (JBI)** [9] для case studies и квази-экспериментальных исследований. Оценка фокусировалась на четкости постановки задачи, описании контекста и интервенции (БСС), методах сбора данных, обоснованности анализа результатов и учете ограничений. Результаты оценки использовались не для исключения статей, а для взвешенной интерпретации их выводов в ходе синтеза и обсуждения.

1.6 Визуализация библиометрических данных (*Data Visualization*).

С целью проведения классификации основных областей применения БСС в АПК и выявление глобальных исследовательских трендов и коллабораций был выбран инструмент для визуализации и анализа библиометрических данных VOSViewer.

В него были загружены исходные данные из Scopus с количеством записей 15310, произведена аналитика.

Результаты исследований и их обсуждение.

2.1. Библиометрический анализ применения БСС в АПК.

В рамках проведенного исследования проведен анализ предметной области 15310 источников с помощью программного продукта VOSViewer.

На представленной визуализации (Рисунок 2) отражена структура научных публикаций, посвящённых внедрению БСС и смежных цифровых технологий в АПК. Визуализация создана с использованием методов анализа совместной встречаемости терминов в научных работах, что позволяет выделить основные тематические кластеры и взаимосвязи между ключевыми концепциями.

Визуализация подтверждает, что исследования в области БСС для АПК носят междисциплинарный характер, объединяя: агрономию, компьютерные науки, экологию и экономику.

В контексте цифровизации АПК ключевыми тенденциями являются интеграция искусственного интеллекта и блокчейн-технологий для анализа данных в реальном времени, ориентация на устойчивое развитие посредством снижения выбросов и ресурсосбережения, усиление значимости кибербезопасности, а также широкое внедрение беспилотных летательных аппаратов и распределенных сенсорных систем для прецизионного мониторинга состояния полей и здоровья животных.

Визуализация наглядно демонстрирует, что БСС являются технологическим ядром современного АПК, обеспечивая связь между физическими процессами и цифровыми платформами для повышения эффективности, устойчивости и доходности сельского хозяйства.

На рисунке 3 представлена сетевая визуализация глобального ландшафта научных исследований в области применения БСС в АПК, основанная на кластеризации стран по паттернам коллаборации и публикационной активности. Полученная карта выявляет региональные исследовательские приоритеты, а также географию центров экспертизы и инновационных хабов. Кроме того, визуализация раскрывает конфигурацию международных коллабораций, которые выступают каналами трансфера технологий. Граф наглядно демонстрирует существующие дисбалансы и пробелы в исследовательской активности между развитыми и развивающимися странами и макрорегионами.

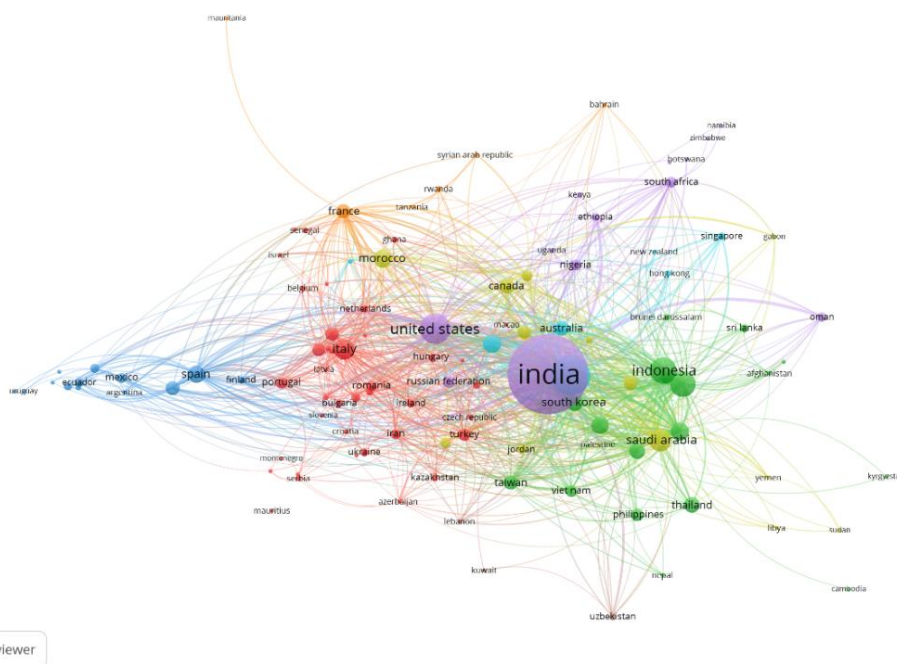


Рисунок 3. Результаты анализа географии исследователей по предметной области в программе VOSViewer/

Figure 3. Results of the geography analysis of researchers by subject area in the VOSViewer program

На основе кластерного анализа глобальных паттернов публикационной активности и научных коллабораций выявлены отчетливые региональные стратегии внедрения БСС в АПК.

Европейский кластер (Германия, Италия, Франция) фокусируется на точном земледелии и устойчивых технологиях в рамках регуляторных инициатив [10], в то время как кластер Латинской Америки (Бразилия, Мексика) ориентирован на мониторинг обширных сельскохозяйственных угодий и оптимизацию водопользования, с Испанией в роли технологического моста.

Регион Ближнего Востока и Северной Африки (Саудовская Аравия, Египет), демонстрирующий высокие показатели цитирования, концентрируется на решениях для засушливых зон (прецизионное орошение, теплицы), где Саудовская Аравия выступает ключевым хабом благодаря масштабным инвестициям [11].

Кластер Африки южнее Сахары и Индии отличается высоким количеством публикаций при относительно низком цитировании, что отражает направленность на разработку доступных БСС-решений для мелких фермерских хозяйств.

Юго-Восточная Азия (Малайзия, Индонезия) специализируется на мониторинге плантационных культур в тропическом климате, а транснациональный кластер во главе с Китаем и Австралией лидирует в интеграции БСС с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), спутниковыми системами и решениях для умного животноводства.

Анализ коллаборационных сетей показал сильные трансрегиональные связи (Китай–Великобритания, Египет–Саудовская Аравия) и значительные пробелы, особенно между странами глобального Юга.

Результаты анализа подтверждают значительную корреляцию между экономическим развитием, климатическими условиями, политическими альянсами и исследовательскими приоритетами, а также указывают на сохраняющееся глобальное неравенство в доступе к передовым технологиям, что требует разработки инклюзивных стратегий для адаптации БСС-решений к локальным агроклиматическим и социально-экономическим контекстам в рамках Четвертой сельскохозяйственной революции [12].

Прецизионное земледелие:

Данное направление переходит от точечных решений к комплексным платформам, объединяющим данные из разных источников для управления всей экосистемой поля.

Ключевая работа (AGRO AI): Платформа AGRO AI [13] демонстрирует тренд на слияние макро- и микроуровней данных. Она интегрирует спутниковые снимки NASA с показаниями полевых IoT-датчиков, чтобы давать фермерам персонализированные рекомендации по поливу, удобрениям и защите растений. Это шаг к созданию «цифрового двойника» фермы.

Автономные решения: Исследование «Fuxi Brain» [14] представляет собой автономную систему принятия решений на базе генеративных ИИ-моделей. Система самостоятельно, без участия человека, управляет всем циклом выращивания кукурузы, от посадки до уборки, демонстрируя высочайшую точность решений.

Глубокое обучение (Deep Learning): Систематический обзор [15] подчёркивает доминирующую роль моделей CNN и рекуррентных нейронных сетей (recurrent neural network, RNN) в задачах прогнозирования урожайности, обнаружения болезней и управления посевами.

Управление поливом и орошением:

В проанализированных работах по этому направлению акцент делается не просто на автоматизации полива, а на эффективном использовании водных ресурсов с помощью адаптивных алгоритмов.

Эффективность и экономия: Система «IoT-Driven Smart Irrigation» [16] показала следующие результаты: сокращение расхода воды на 47% при одновременном увеличении урожайности салата на 43%. Это достигается за счёт точного контроля влажности почвы и применения органических биостимуляторов.

Интеллектуальное управление: Исследование «Advanced Fuzzy Logic Control» [17] предлагает систему управления, анализирующую совокупность параметров, таких как влажность почвы, температуру, влажность воздуха, солнечную радиацию и уровень питательных веществ. Нейро-нечёткий контроллер реализует систему принятия решений, сокращая энергопотребление до 54%.

Доступность: Важным трендом является создание низкобюджетных решений [18], что делает технологии умного орошения доступными для мелких и средних фермеров.

Умные теплицы и фитотроны:

Основной акцент в публикациях занимают максимизация энерго и ресурсоэффективности, автономность и круглогодичная устойчивость производства в условиях городов или неблагоприятного климата.

Энергетическая оптимизация: Система SGEM [19] представляет собой полноценную микросеть для теплицы. Она интегрирует солнечные панели, аккумуляторы и сеть, а гибридный алгоритм оптимизации (PSO+COA) динамически управляет энергией, снижая затраты на 50% и выбросы CO₂.

Урбанистическое сельское хозяйство: Концепция контейнерной фермы [20] и вертикальных теплиц [21] решает проблему нехватки земли в городах. Используются мобильные стеллажи, рекуперация воды из конденсата и полный IoT-контроль, что делает производство зелени локальным и устойчивым.

Новые методы контроля: Применение интегрированных систем связи и зондирования (ISAC) [22] позволяет бесконтактно и непрерывно контролировать водный статус растений (салата), используя саму беспроводную связь как датчик, что снижает затраты и упрощает систему.

Животноводство (точное животноводство):

Это направление быстро развивается, фокусируясь на благополучии животных, профилактике заболеваний и оптимизации кормления для повышения продуктивности и устойчивости.

Аквакультура: Обзор [23] описывает, как ИИ и компьютерное зрение модернизирует отрасль рыбоводства: от мониторинга качества воды в реальном времени до автоматической оценки биомассы, обнаружения болезней и оптимизации кормления.

Безопасность пищевых продуктов: В мясном животноводстве система на базе Industry 4.0 [24] использует блокчейн, IoT и цифровые двойники для обеспечения прослеживаемости и соблюдения стандартов (например, халяль) на всём пути от фермы до прилавка, повышая доверие потребителей.

Ранняя диагностика: Система AI-Enabled Thermal Imaging [25] для выявления мастита у крупного рогатого скота (КРС) сочетает инфракрасные камеры и ИИ для раннего обнаружения воспаления по термограмме вымени, что позволяет быстрее реагировать и снижать использование антибиотиков.

Автоматический мониторинг состояния: Walk-Over Weighing System (WoWS) с ИИ [26] позволяет ежедневно автоматически взвешивать скот без стресса для животных. Анализ динамики веса помогает выявлять проблемы со здоровьем или питанием на ранней стадии.

Контроль условий содержания: Сравнительный обзор технологий мониторинга выбросов аммиака [27] в свиноводстве важен для обеспечения здоровья животных, персонала и экологии, помогая выбрать оптимальные сенсоры (электрохимические, фотоакустические и др.).

2.2. Технические аспекты и архитектуры БСС в АПК.

Аппаратное обеспечение: В области анализа технических средств, применяемых в БСС для мониторинга объектов АПК наблюдается достаточно сильная диверсификация типов оборудования под разные задачи и условия эксплуатации.

Сенсоры и узлы:

Многофункциональные: В статьях фигурируют комбинированные сенсоры для почвы (влажность, температура, NPK-датчики, в т.ч. спектрометры для тяжёлых металлов [28]), атмосферы (DHT: температура, влажность), газа (аммиак NH₃ [5]).

Бесконтактные и косвенные: Используются камеры (RGB, мультиспектральные, тепловизионные) и методы интегрированного зондирования и связи (ISAC) [5], где сам радиосигнал служит для измерения влажности среды выращивания растений.

Магнитно-индуктивные: Для подземного мониторинга (Интернет Подземных Вещей, IoT) применяются магнитно-индуктивные сети [29], обеспечивающие связь в сложных грунтах, где традиционные радиочастотные сигналы затухают.

Вычислительные платформы:

Микроконтроллеры (MCU) для TinyML: ESP32 (особенно ESP32-S3) является де-факто стандартом для развёртывания моделей периферийных ИИ (Edge AI). В работе [30] представлена модель для обнаружения болезней томатов, реализуемая на ESP32-S3.

Одноплатные компьютеры: Raspberry Pi (например, 4B в [31]) используется как более мощный шлюз или узел обработки изображений и управления (в роботах, умных ловушках).

Специализированные платы для теплиц/фитотронов: Разрабатываются низковольтные IoT-узлы на базе ESP32 с питанием от солнечных панелей, интегрированные в систему управления микроклиматом [19].

Энергетика: Рассматриваются модели оптимального расположения сенсорных узлов, оптимизирующих энергоэффективность БСС [32].

Находит применение использование технологий возобновляемой энергетики, в частности солнечные панели с литий-ионными аккумуляторами для обеспечения автономности полевых устройств, роботов [33] и умных ловушек [31].

Протоколы связи и стандарты:

Выбор протокола определяется дальностью связи, энергопотреблением, скоростью передачи данных и стоимостью.

Короткая дистанция / Локальные сети (Field Area Network):

Wi-Fi (IEEE 802.11): Используется внутри теплиц, ферм, складов для передачи больших объёмов данных (видео, изображения) на шлюзы. Часто связывает датчики, камеры или другие элементы с локальным сервером [30].

Bluetooth Low Energy (BLE): Для связи носимых датчиков на животных со стационарными считывателями или шлюзами.

Дальняя дистанция / Низкое энергопотребление (LPWAN):

LoRa / LoRaWAN: Ключевой протокол для сельской местности. Доминирует в исследованиях для мониторинга окружающей среды, к примеру для мониторинга аммиака и почвы [5]. Ключевыми преимуществами технологии является большая дальность радиопередачи (несколько км), низкое энергопотребление и как следствие большой срок автономной работы.

NB-IoT / LTE-M (в контексте 5G): Рассматривается как перспективная замена/дополнение LoRa, особенно там, где требуется гарантированное качество связи (Quality of Service, QoS) и интеграция с существующей инфраструктурой мобильных операторов. Исследования [34] посвящены реализации технологии 5G для плантаций сахарного тростника.

Спутниковая связь:

Низкоорбитальные спутники (LEO): Упомянуты как решение для глобальной связи в удалённых районах, например, для мониторинга морских контейнеров с растениями [35]. На сегодняшний день стоимость данной технологии высока, однако обоснована ее применения для повышения автономности мониторинга удаленных объектов.

Протоколы прикладного уровня:

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) стандарт часто используется для реализации IoT, в том числе для сбора и обработки данных [30].

HTTP/HTTPS, REST API: Для взаимодействия с облачными платформами (Blynk, ThingsBoard, собственные сервисы) и веб-интерфейсами.

Архитектуры сетей:

Анализ архитектуры используемых в АПК сенсорных сетей показывает эволюционный подход от простого сбора данных к сложным многоуровневым гибридным системам [4].

Трёхуровневая классическая архитектура (Устройство → Шлюз → Облако): Остаётся базовой. Датчики → Шлюз (собирает данные, к примеру, LoRa/Wi-Fi) → Облачный сервис (аналитика, дашборд). Пример: большинство систем умного орошения.

Периферийные вычисления (Edge Computing) [30]:

Смещение интеллекта на край сети — главный тренд для снижения задержек, расхода трафика и обеспечения работы при обрыве связи.

TinyML на MCU: Локальный вывод моделей ИИ прямо на микроконтроллере датчика.

Шлюз с ИИ (Edge AI Gateway): Более мощные одноплатные компьютеры (Jetson Nano, Raspberry Pi) на краю сети анализируют видео с камер, обрабатывают данные с группы датчиков.

Fog Computing (Туманные вычисления): Локальный сервер на ферме агрегирует данные с нескольких краевых устройств, выполняет предобработку и отправляет в облако только сводные результаты.

На уровне устройства используются модели технического состояния [36], оцениваемые по коэффициенту взаимной корреляции сигналов, который чувствителен к деградации и шумам. Для оптимизации энергопотребления применялись алгоритмы, динамически переключающие режим передачи в зависимости от качества канала, что повысило надежность и автономность устройства.

На уровне канала передачи данных применялась модель энергопотерь, связывающая вероятность ошибки (BER), температуру узла, глубину замираний (K-фактор) и SNR. Это позволяет прогнозировать энергопотребление и надёжность узла. Для минимизации общих потерь в условиях помех используются алгоритмы, динамически выбирающие оптимальную длину пакета и мощность передатчика, что увеличивает время автономной работы сети без снижения достоверности данных [37].

Гибридные облачно-краевые архитектуры (Cloud-Edge Hybrid):

Сложные системы, такие как «Fuxi Brain» [14], используют распределённую архитектуру. Данные собираются краевыми устройствами, первичная обработка и реагирование происходят на краю, а обучение сложных генеративных моделей, консолидация данных с множества ферм и долгосрочное стратегическое планирование выполняются в облаке.

Специализированные сетевые архитектуры:

Беспроводные сенсорные сети (WSN) с кластеризацией: Для мониторинга больших полей актуальны энергоэффективные протоколы маршрутизации. В статьях предлагаются и оптимизируются алгоритмы выбора кластерных голов (Cluster Head) для балансировки нагрузки и продления жизни сети [38,39].

Воздушно-наземные совместные сети (Air-Ground Collaborative): Архитектура, где дроны (UAV) выступают как мобильные базовые станции или ретрансляторы для сбора данных с наземных датчиков в зонах со слабым покрытием [40]. Оптимизируется траектория полёта дрона и время контакта с сенсорами.

Магнитно-индуктивные подземные сети: Специальная архитектура для IoT, где узлы образуют сеть для ретрансляции сигналов через грунт к наземному шлюзу [29].

Архитектура интеграции данных:

Платформенный подход: Статьи описывают создание единых сельскохозяйственных IoT-платформ (например, AgriSmart, [41]), которые интегрируют данные от разнородных источников (датчики, дроны, спутники, метеостанции) и предоставляют единый интерфейс для управления и аналитики.

2.3. Влияние БСС на показатели эффективности АПК (Анализ KPI).

Представленная таблица 1 демонстрирует количественное влияние технологий умного сельского хозяйства (БСС, IoT, ML и др.) на ключевые показатели эффективности АПК. Данные, систематизированные по шести основным KPI, показывают значительную эффективность внедрения: повышение урожайности до 43%, экономию ресурсов (воды, удобрений, энергии) до 50%, улучшение качества продукции и автоматизацию труда. Примеры из анализируемых научных публикаций отражают практические результаты, а перечисленные технологии раскрывают инструментальную основу для реализации данных улучшений.

Таблица 1. Анализ показателей эффективности применения БСС в АПК

Ключевой показатель эффективности (КПИ)	Количественное улучшение	Примеры из научных публикаций	Технологии / Методы
1. Повышение урожайности	+20% до +43%	<ul style="list-style-type: none"> Умное орошение с увеличением урожайности до 40% [40]. Умная система для выращивания риса (RiceBlock): [43]. Автономная система «Fuxi Brain» для кукурузы: точность решений 92.3% [14]. 	IoT-сенсоры, ML-прогноз, оптимизация ресурсов, предиктивный анализ.
2. Экономия воды (иригация)	от 25% до 50%	<ul style="list-style-type: none"> IoT-система орошения, снижающая потребление воды до 47% [16]. Система, рассмотренная в [18], позволяет сэкономить 25–35% воды. Система с нечёткой логикой, снижающая энергопотребление до 54% [17]. 	Почвенные датчики, погодные данные, адаптивные контроллеры, модели ET.
3. Снижение расхода удобрений и химикатов	до 32% (N), 30% (вода/удобрения)	<ul style="list-style-type: none"> Оптимизация азота для кукурузы, снижающая его использование до 32% при тех же значениях урожайности [41]. Вертикальные фермы позволяют сократить количество вносимых удобрений до 30% [21]. 	Сенсоры NPK, спутниковые индексы (NDVI), прецизионное внесение, ранняя диагностика.
4. Снижение энергопотребления	до 50% (тепличные системы)	<ul style="list-style-type: none"> Умная теплица (SGEM), снижающая затраты на электроэнергию на 49.98%, CO₂ на 50.5% [19]. Контейнерная ферма: оптимизация освещения и HVAC [20]. Оптимизация кластеризации WSN: продление жизни сети на 10–20% [39]. 	Солнечная энергия, гибридные оптимизационные алгоритмы, энергоэффективные протоколы.
5. Улучшение качества и снижение потерь	Раннее обнаружение (точность >94%), снижение потерь при хранении	<ul style="list-style-type: none"> Обнаружение болезней томатов при заданной точности: 94.6% [30]. Мониторинг зерна (IoT), снижающий потери при его хранении [44]. Технология мониторинга транспортировки растений, осуществляющая контроль их состояния [35]. 	Компьютерное зрение, спектроскопия, IoT-мониторинг условий хранения.
6. Оптимизация труда и управленческих решений	Автоматизация, снижение трудозатрат	<ul style="list-style-type: none"> Автоматическое взвешивание скота, снижающее использование ручного труда [26]. Прогнозирование оптимального сбора чая со значением абсолютной ошибки ±2.7 дня [45]. Автономные решения (роботы, «Fuxi Brain») [14]. 	Автономные системы, предиктивные модели, облачные дашборды.

2.4. Интеграция БСС с другими технологиями.

На основе анализа статей можно выделить следующие ключевые направления интеграции:

БСС как основа для IoT-платформ [46]

БСС предоставляет поток первичных данных в реальном времени, который служит основой для сельскохозяйственных IoT-платформ.

Архитектура платформы: Типичная платформа (например, AgriSmart, [41]) имеет трехуровневую структуру:

Физический уровень (БСС): Датчики почвы, климата, воды, изображений.

Сетевой уровень: Шлюзы, собирающие данные по LoRaWAN/Wi-Fi и передающие их в облако через MQTT/HTTP.

Уровень приложений (Платформа): Облачный сервис для агрегации, визуализации (дашборды, как в Blynk или ThingsBoard), аналитики и управления (включение/отключение полива, вентиляции).

Пример: AGRO AI [13] – это платформа, где данные с наземных БСС объединяются со спутниковыми снимками в едином интерфейсе, предоставляя фермеру комплексные рекомендации.

Интеграция с системами поддержки принятия решений (DSS)

DSS трансформируются из статических систем в динамические, предиктивные и автономные за счет интеграции с БСС.

От реагирования к прогнозированию: классические DSS зачастую используются исторические данные. Современные системы, такие как «Fuxi Brain» [14], используют поток данных с БСС для непрерывного пересчета оптимальных решений по модели Model Predictive Control (MPC).

Процессно-ориентированные модели: Интеграция с DSSAT [41] позволяет не просто фиксировать текущую влажность почвы, а моделировать отклик урожая на различные сценарии полива или внесения азота, выбирая оптимальный.

Автоматизация решений: DSS эволюционирует до автономной системы принятия решений, где агроном лишь утверждает стратегию, а тактические команды (включить клапан, запустить дрон) отдаются автоматически на основе данных БСС.

Интеграция с геоинформационными системами (ГИС), дронами и робототехникой

БСС обеспечивает точечную, непрерывную валидацию данных, получаемых с дронов и спутников.

ГИС и БСС (Создание "цифрового двойника" поля): Данные точечных сенсоров влажности или азота (in-situ) используются для калибровки и интерполяции пространственных данных со спутников (Sentinel-2, LANDSAT) или мультиспектральных камер дронов. Это создает точные карты неоднородности поля [47].

Дроны (UAV) как мобильные сенсорные платформы и ретрансляторы:

Сбор данных: Дроны с камерами и мультиспектральными датчиками осуществляют периодический скрининг больших площадей, дополняя стационарные БСС.

Доставка интернета: В схемах воздушно-наземной совместной работы (Air-Ground Collaborative) дрон выступает как мобильная базовая станция, пролетая над кластерами наземных БСС для сбора данных в районах без покрытия [40].

Робототехника:

Автономные агроботы [33] используют данные БСС (например, карту очагов болезней, построенную по данным сенсоров и дронов) для точечного применения пестицидов или прицельного отбора проб.

БСС направляет робота к проблемным зонам, минимизируя его перемещения и расход энергии.

3. Обработка данных.

Выбор оптимального уровня обработки данных определяется стоящими задачами и требованиями к ресурсам. Таблица 2 обобщает распределение задач между уровнями

(устройство, край, облако) и приводит примеры их практического применения, демонстрируя тем самым принцип многоуровневой архитектуры современных систем.

Таблица 2. Примеры систем обработки данных

Уровень	Задачи и технологии	Примеры из статей
Устройство (Device/TinyML)	Мгновенная реакция, сокращение трафика. <ul style="list-style-type: none"> • Локальный вывод простых моделей ИИ. • Предобработка сырых данных. • Базовая фильтрация и агрегация. 	<ul style="list-style-type: none"> • Обнаружение болезни листа томата прямо на ESP32-S3 [30]. • Предсказание избыточной энергии для зарядки электромобилей на мини-сетях [48].
Периферия (Edge/Fog)	Локальная аналитика, управление группой устройств. <ul style="list-style-type: none"> • Анализ видео с камер в реальном времени. • Запуск более сложных ML-моделей. • Принятие оперативных решений для автономных систем. 	<ul style="list-style-type: none"> • Шлюз на Raspberry Pi в умной теплице обрабатывает данные с массива датчиков и управляет климатом [19]. • Оптимизация маршрута дрона для сбора данных на краю сети.
Облако (Cloud)	Глобальная аналитика, долгосрочное хранение, сложное моделирование. <ul style="list-style-type: none"> • Консолидация данных со множества объектов. • Обучение и дообучение сложных ИИ-моделей (трансформеры, большие языковые модели). • Стратегическое планирование и бизнес-аналитика. 	<ul style="list-style-type: none"> • Платформа AGRO AI объединяет данные с ферм и спутников для макроанализа [13]. • Генеративная ИИ-модель "Fuxi Brain" работает в облаке, принимая стратегические решения [14].

Заключение. Проведенный систематический обзор подтверждает, что БСС являются ключевым технологическим элементом цифровой трансформации АПК. На основе анализа современных исследований (2021–2026 гг.) выявлено, что БСС обеспечивают переход от фрагментированных, эмпирических методов управления к целостным, основанным на данных, предиктивным и зачастую автономным системам.

Результаты демонстрируют значимое положительное влияние БСС на ключевые показатели эффективности АПК: повышение урожайности (до 43%), существенную экономию воды (25–50%) и удобрений (до 32%), снижение энергопотребления (до 50%), а также улучшение качества продукции и оптимизацию трудовых затрат. Эти эффекты достигаются за счет прецизионного мониторинга в реальном времени и адаптивного управления агропроцессами в растениеводстве и животноводстве.

Технологический ландшафт БСС в АПК характеризуется развитием в сторону сложных гибридных архитектур, объединяющих устройства, периферийные (edge) и облачные вычисления. Доминирующими трендами являются интеграция искусственного интеллекта, применение энергоэффективных протоколов дальней связи и комбинированных сенсоров, а также конвергенция БСС с другими технологиями (дроны, робототехника, ГИС, блокчейн), что позволяет создавать комплексные платформы «умного» сельского хозяйства.

Несмотря на очевидный прогресс, сохраняются технологические и внедренческие барьеры: высокая стоимость развертывания, вопросы автономности сенсорных узлов, кибербезопасности, надежности связи в сложных условиях, а также недостаток стандартизации. Кроме того, библиометрический анализ выявил неравномерность исследовательской активности и доступа к технологиям между развитыми и развивающимися регионами.

Таким образом, БСС служат технологическим ядром для построения устойчивого, ресурсоэффективного и конкурентоспособного агропромышленного комплекса, отвечающего вызовам роста населения, изменения климата и необходимости обеспечения продовольственной безопасности. Дальнейший успех зависит от междисциплинарных усилий, направленных на преодоление существующих барьеров и реализацию интеграционного потенциала цифровых технологий на всех этапах цепочки создания стоимости в АПК.

Список источников

1. Bayrakdar M. E. Energy-Efficient Technique for Monitoring of Agricultural Areas with Terrestrial Wireless Sensor Networks // *Journal of Circuits, Systems and Computers*. 2020. Vol. 29, No. 9, Art. 2050141. <https://doi.org/10.1142/S0218126620501418>
2. Jawad H. M., Nordin R., Gharghan S. K., Jawad A. M., Ismail M. Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review // *Sensors*. 2017. Vol. 17. No. 8. Art. 1781. <https://doi.org/10.3390/s17081781>
3. Капустин С. В., Халабия Р. Ф. Система оценки энергоэффективности синхронизированного доступа в имитационной модели беспроводной сенсорной сети // *Современная наука и инновации*. 2020. № 1. С. 35–39. <https://doi.org/10.33236/2307-910X-2020-1-29-35-39>
4. Самойленко В. В. Концепция многоуровневой сетевой инфраструктуры мониторинга агропромышленных объектов на основе беспроводных сенсорных сетей // *Advanced Engineering Research*. 2025. Т. 25. № 4. С. 371–382. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-4-2238>
5. Anikó N., Tarek A., Arshad S., Nóra G., Miklós N., Mirzaei M., Szilárd S., Harsanyi E., Al-Dalahmeh M., Mohammed S. Real-time monitoring of ammonia emissions from cereal crops using LoRaWAN-based sensing technology // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 16. Art. 1446. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-31661-3>
6. Popli S., Jha R. K., Jain S. Adaptive Small Cell position algorithm (ASPA) for green farming using NB-IoT // *Journal of Network and Computer Applications*. 2021. Vol. 173. Art. 102841. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102841>
7. Page M. J., McKenzie J. E., Bossuyt P. M., Boutron I., Hoffmann T. C., Mulrow C. D., Shamseer L., Tetzlaff J. M., Akl E. A., Brennan S. E., Chou R., Glanville J., Grimshaw J. M., Hróbjartsson A., Lalu M. M., Li T., Loder E. W., Mayo-Wilson E., McDonald S., McGuinness L. A., Stewart L. A., Thomas J., Tricco A. C., Welch V. A., Whiting P., Moher D. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews // *The BMJ*. 2021. Vol. 372. Art. n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
8. Hosseini M.-S., Jahanshahlou F., Akbarzadeh M. A., Zarei M., Vaez-Gharamaleki Y. Formulating research questions for evidence-based studies // *Journal of Medicine, Surgery, and Public Health*. 2024. Vol. 2. Art. 100046. <https://doi.org/10.1016/j.glmedi.2023.100046>
9. Joanna Briggs Institute. JBI critical appraisal tools. <https://jbi.global/Critical-Appraisal-Tools> (n.d.).
10. Arvidsson S., Dumay J. Corporate ESG reporting quantity, quality and performance: Where to now for environmental policy and practice? // *Business Strategy and the Environment*. 2022. Vol. 31(3). P. 1091–1110. <https://doi.org/10.1002/bse.2937>
11. Alhazmy E. A. Education reform and vision 2030 in Saudi Arabia: challenges and pathways // *Discover Education*. 2026. Vol. 5. Art. 40. <https://doi.org/10.1007/s44217-025-01005-4>
12. Rahaman M. M., Azharuddin M. Wireless sensor networks in agriculture through machine learning: A survey // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 197. Art. 106928. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106928>
13. Arefin M. S., Mahin M. I. S., Mily F. A., Sani M. S. H., Rehan M. I., Sumon T. I. AGRO AI: A compact solution for modernizing the agriculture using NASA's satellite data and artificial intelligence // *Applied Food Research*. 2026. Vol. 6(1). Art. 101678. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2026.101678>
14. Chen H., Hou G., Hua C., Wang S., Chen Z., Zhang Y. Agricultural autonomous decision-making system "Fuxi Brain" Based on generative large model fusion internet of things // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2026. Vol. 244. Art. 111454. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2026.111454>
15. Chettri K., Sen B., Ghosal P. Deep learning for precision agriculture: a systematic review of methods, challenges, and future directions // *Knowledge and Information Systems*. 2026. Vol. 68. Art. 35. <https://doi.org/10.1007/s10115-025-02625-w>
16. Mohamed Z. E., Afify M. K., Badr M. M., Omar O. A. IoT-driven smart irrigation system to improve water use efficiency // *Scientific Reports*. 2026. Vol. 16. Art. 2609. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-33826-6>
17. Bushnag A., Chaabane S. B., Harrabi R., Alharbi L. A., Alshmrani M., Abuzneid S. Smart agriculture: IoT-Based smart irrigation with advanced fuzzy logic control // *Expert Systems with Applications*. 2026. Vol. 299. Art. 130168. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.130168>
18. Boukri Y., Hamicci H. S., Mansour R. F., Maamar A. E. T., Ghoneim S. S. M., Paramasivam P., Hashim M. A., Hussein E. E. Analysis and experimental implementation of affordable smart irrigation system

- using IoT to reduce agricultural costs and minimize water usage // *Applied Water Science*. 2026. Vol. 16. Art. 36. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02727-4>
19. Haggag M. W., Rabie A. H., Ismael I., Shaaban W. A real-time smart energy management system for greenhouses using a hybrid optimization algorithm: Experimental implementation for efficient and sustainable operation // *Computers and Electrical Engineering*. 2026. Vol. 131. Art. 110948. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2026.110948>
 20. Xiong T., Chen G., Cai W., Zha L., Xu G., Wang A., Wei Y., Lu X., Wei S., Lai D., Zhang J., Bao H. Design and development of a low-cost and energy-efficient container farm for leafy greens // *Cleaner Engineering and Technology*. 2026. Vol. 30. Art. 101135. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.101135>
 21. Sharma P., Thakur N. Advancing urban food sustainability: Biotechnology and IoT synergies in vertical greenhouses // *Bioresource Technology Reports*. 2026. Vol. 33. Art. 102548. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2026.102548>
 22. Yang N., Du R., Yu N., He W., Wang Z., Du X., Chen S. Integrated sensing and communication for lettuce water-status monitoring // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2026. Vol. 242. Art. 111370. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.111370>
 23. Sen K., Dey S., Ganguly A., Rajak P. Artificial intelligence in aquaculture: Advancing sustainable fish farming through AI-driven monitoring, optimization, and disease management // *Aquaculture*. 2026. Vol. 614. Art. 743602. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2025.743602>
 24. Ellahi R. M., Wood L. C., Bekhit A. E.-D. A. A multi-layer Industry 4.0 framework for ensuring halal integrity in NZ meat supply chains // *Food Control*. 2026. Vol. 182. Art. 111880. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111880>
 25. Asogan A., Sazali N., Veerendra A. S., Samylingam L., Aslfattahi N., Kok C. K., Kadirgama K. A review on the impact of AI-enabled thermal imaging and IoT sensor fusion on early detection of mastitis in dairy cattle // *Biosensors and Bioelectronics: X*. 2026. Vol. 28. Art. 100735. <https://doi.org/10.1016/j.biosx.2025.100735>
 26. Kırbaş İ. AI-based automated weight prediction in cattle for herd health surveillance // *Preventive Veterinary Medicine*. 2026. Vol. 247. Art. 106752. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2025.106752>
 27. Aroh I. M., McCutcheon G., Macartan B. P., Kuneš R., Curran T. P., Clarke L. Monitoring ammonia emissions in pig facilities: a comparative review of measurement technologies, monitoring protocols, and technology decision-support framework // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2026. Vol. 241. Art. 111238. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.111238>
 28. Fu C., Zhuang Q., Tian A. An IoT-based measurement system for the quantitative analysis of soil heavy metals integrating fractional-order signal processing and multi-task learning // *Measurement*. 2026. Vol. 260. Art. 119822. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.119822>
 29. Li Z. A magnetic induction network for high-resolution, real-time soil moisture monitoring in complex subsurface environments // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2026. Vol. 242. Art. 111314. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.111314>
 30. Malche T., Joshi M., Upadhyay G. M., Soni P. K. Automated tomato leaf disease detection and alert system using Internet of Things and TinyML // *Discover Internet of Things*. 2026. Vol. 6. Art. 8. <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00257-8>
 31. Zarboubi M., Bellout A., Chabaa S., Dliou A. Enhancing integrated pest management with IoT and YOLO-Evo: A smart, low-cost monitoring system for sustainable apple farming // *Results in Engineering*. 2026. Vol. 29. Art. 108850. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108850>
 32. Fedorenko V., Samoylenko I., Samoylenko V. Energy-balanced distribution of radio modules with various technical states among positions of nodes in wireless sensor networks // *AEU - International Journal of Electronics and Communications*. 2021. Vol. 138. Art. 153849. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2021.153849>
 33. Talaat F. M., Ibrahim M. A., Karim A. A., Elsonbaty H. K., Al-Zoghby A. M. IoT-Integrated robotic system for automated plant disease detection and environmental monitoring // *Scientific Reports*. 2026. Vol. 16. Art. 1638. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-32624-4>
 34. Dahmir F., Krisnowo A., Soehadi G., Widodo A., Appe J., Budiwati S. V., Haryanto G., Taufik M., Karim S., Putera I. P., Prabowo J., Dwiono A., Ilyas A. 5G utilization for smart farming to enhance productivity of sugarcane plantations in Indonesia // *Discover Sustainability*. 2025. Vol. 7. Art. 86. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-02073-0>
 35. Méndez B., Lamo P. IoT node for monitoring and traceability of live plants in maritime transport // *Array*. 2026. Vol. 29. Art. 100621. <https://doi.org/10.1016/j.array.2025.100621>

36. Fedorenko V., Samoilenko V., Vinogradenko A., Samoilenko I., Sharipov I., Anikuev S. Mathematical Aspects of Stable State Estimation of the Radio Equipment in Terms of Communication Channel Functioning // Distributed Computer and Communication Networks / Vishnevskiy V. M., Samouylov K. E., Kozyrev D. V. (Eds.). Cham: Springer International Publishing, 2019. P. 547–559. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36625-4_44
37. Fedorenko V., Samoilenko I., Samoilenko V. Fragmentation of data packets in wireless sensor network with variable temperature and channel conditions // Computer Communications. 2024. Vol. 214. P. 201–214. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2023.12.001>
38. Awlla A. H., Rashid T. A., Abdullah R. M. A Dynamic-Weight Multi-Objective Sloth-Inspired Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks // International Journal of Communication Systems. 2026. Vol. 39. Art. e70395. <https://doi.org/10.1002/dac.70395>
39. Sennan S., S S., Somula R., Pandey D., Cho Y. A multi-objective grey wolf optimization algorithm for energy-efficient cluster-based routing in IoT-enabled WSNs // Scientific Reports. 2025. Vol. 16. Art. 179. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-28950-2>
40. Sun W., Wang H., Qin Z., Guo X. Air–Ground Collaborative Networking and Transmission Scheduling for Opportunistic UAV-Assisted Data Collection // IEEE Internet of Things Journal. 2026. Vol. 13. P. 4931–4948. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2025.3637836>
41. Tao X., Butcher J., Cumini C., Talasila M., Montserrat S. C., Sacco A., Popp M., Marchetto G., Silvestri S. AgriSmart: An IoT-enabled framework for agricultural resource optimization // Computer Communications. 2026. Vol. 248. Art. 108416. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2026.108416>
42. Самойленко В. В. Экономико-математическая оптимизация структуры беспроводных сенсорных сетей для интенсивных садов // Известия Высших Учебных Заведений. Серия «Экономика, Финансы и Управление Производством» [Ивэкофин]. 2025. Т. 66. С. 136–145.
43. Paki Z. S., Yakubu B. M., Boukari S., Latif R., Jamail N. S. M., Gital A. Y., Fati S. M. Blockchain based precision rice farming framework using deep learning techniques // Discover Internet of Things. 2025. Vol. 6. Art. 5. <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00264-9>
44. Jain P., Alam M. S., Saini M. K., Aslam R. Recent technological innovations and strategies for reducing post-harvest losses during bulk grain storage: Applications of IoT and non-destructive quality evaluation // Journal of Stored Products Research. 2026. Vol. 116. Art. 102893. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2025.102893>
45. Chen H.-C., Chen S.-F., Lin S.-R., Lin T.-T. IoT-based automated monitoring and assessment of tea shoot density using canopy imaging // Computers and Electronics in Agriculture. 2026. Vol. 241. Art. 111251. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.111251>
46. Samoilenko V., Fedorenko V., Samoilenko I. Comparative Analysis of Digital Platforms for Agriculture 4.0 in Russia: Current Level and Ways for Improvement // Innovations in Sustainable Agricultural Systems, Agriculture 4.0 and Precision Agriculture, Volume 2 / Samoilenko I., Rajabov T. (Eds.). Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. P. 43–51. https://doi.org/10.1007/978-3-031-98127-2_4
47. Mamun Q., Zaman A., Ip R. H. L., Haque K. M. S. A bibliographic study of integrating IoT and geospatial modelling for sustainable smart agriculture in developed countries: Focus on Australia // Computers and Electronics in Agriculture. 2026. Vol. 241. Art. 111289. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.111289>
48. Mensah G., Opoku R., Davis F., Obeng G. Y., Kornyo O., Marfo D., Addai M., Dampsey J., Wetajega S. D. Machine learning-assisted innovative charging strategy for e-mobility in rural communities operated by redundant energy on solar PV mini-grids // Energy Conversion and Management: X. 2026. Vol. 30. Art. 101591. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.101591>

References

1. Bayrakdar ME. Energy-Efficient Technique for Monitoring of Agricultural Areas with Terrestrial Wireless Sensor Networks. Journal of Circuits, Systems and Computers. 2020;29(11):2050141. <https://doi.org/10.1142/S0218126620501418>
2. Jawad HM, Nordin R, Gharghan SK, Jawad AM, Ismail M. Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review. Sensors. 2017;17(8):1781. <https://doi.org/10.3390/s17081781>
3. Kapustin SV, Khalabiya RF. System for assessing the energy efficiency of synchronous access in a wireless sensor network simulation model. Modern Science and Innovations. 2020;(1):35-39. (In Russ.). <https://doi.org/10.33236/2307-910X-2020-1-29-35-39>

4. Samoylenko VV. Concept of a Multilevel Network Infrastructure for Monitoring Agricultural Facilities Based on Wireless Sensor Networks. *Advanced Engineering Research*. 2025;25(4):371-382. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2025-25-4-2238>
5. Anikó N, Tarek A, Arshad S, Nóra G, Miklós N, Mirzaei M, Szilárd S, Harsányi E, Al-Dalahmeh M, Mohammed S. Real-time monitoring of ammonia emissions from cereal crops using LoRaWAN-based sensing technology. *Scientific Reports*. 2025;16:1446. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-31661-3>
6. Popli S, Jha RK, Jain S. Adaptive Small Cell position algorithm (ASPA) for green farming using NB-IoT. *Journal of Network and Computer Applications*. 2021;173:102841. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102841>
7. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, Shamseer L, Tetzlaff JM, Akl EA, Brennan SE, Chou R, Glanville J, Grimshaw JM, Hróbjartsson A, Lalu MM, Li T, Loder EW, Mayo-Wilson E, McDonald S, McGuinness LA, Stewart LA, Thomas J, Tricco AC, Welch VA, Whiting P, Moher D. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 2021;n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
8. Hosseini M-S, Jahanshahlou F, Akbarzadeh MA, Zarei M, Vaez-Gharamaleki Y. Formulating research questions for evidence-based studies. *Journal of Medicine, Surgery, and Public Health*. 2024;2:100046. <https://doi.org/10.1016/j.glmedi.2023.100046>
9. Joanna Briggs Institute. JBI critical appraisal tools. [Online]. Available: <https://jbi.global/critical-appraisal-tools> (accessed: 22.04.2026).
10. Arvidsson S, Dumay J. Corporate ESG reporting quantity, quality and performance: Where to now for environmental policy and practice? *Business Strategy and the Environment*. 2022;31(3):1091-1110. <https://doi.org/10.1002/bse.2937>
11. Alhazmy EA. Education reform and vision 2030 in Saudi Arabia: challenges and pathways. *Discover Education*. 2025;5:40. <https://doi.org/10.1007/s44217-025-01005-4>
12. Rahaman MM, Azharuddin M. Wireless sensor networks in agriculture through machine learning: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022;197:106928. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106928>
13. Arefin MS, Mahin MIS, Mily FA, Sani MSH, Rehan MI, Sumon TI. AGRO AI: A compact solution for modernizing the agriculture using NASA's satellite data and artificial intelligence. *Applied Food Research*. 2026;6:101678. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2026.101678>
14. Chen H, Hou G, Hua C, Wang S, Chen Z, Zhang Y. Agricultural autonomous decision-making system "Fuxi Brain" Based on generative large model fusion internet of things. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2026;244:111454. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2026.111454>
15. Chettri K, Sen B, Ghosal P. Deep learning for precision agriculture: a systematic review of methods, challenges, and future directions. *Knowledge and Information Systems*. 2026;68:35. <https://doi.org/10.1007/s10115-025-02625-w>
16. Mohamed ZE, Afify MK, Badr MM, Omar OA. IoT-driven smart irrigation system to improve water use efficiency. *Scientific Reports*. 2026;16:2609. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-33826-6>
17. Bushnag A, Chaabane SB, Harrabi R, Alharbi LA, Alshmrani M, Abuzneid S. Smart agriculture: IoT-Based smart irrigation with advanced fuzzy logic control. *Expert Systems with Applications*. 2026;299:130168. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.130168>
18. Boukri Y, Hamici HS, Mansour RF, Maamar AET, Ghoneim SSM, Paramasivam P, Hashim MA, Hussein EE. Analysis and experimental implementation of affordable smart irrigation system using IoT to reduce agricultural costs and minimize water usage. *Applied Water Science*. 2026;16:36. <https://doi.org/10.1007/s13201-025-02727-4>
19. Haggag MW, Rabie AH, Ismael I, Shaaban W. A real-time smart energy management system for greenhouses using a hybrid optimization algorithm: Experimental implementation for efficient and sustainable operation. *Computers and Electrical Engineering*. 2026;131:110948. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2026.110948>
20. Xiong T, Chen G, Cai W, Zha L, Xu G, Wang A, Wei Y, Lu X, Wei S, Lai D, Zhang J, Bao H. Design and development of a low-cost and energy-efficient container farm for leafy greens. *Cleaner Engineering and Technology*. 2026;30:101135. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.101135>
21. Sharma P, Thakur N. Advancing urban food sustainability: Biotechnology and IoT synergies in vertical greenhouses. *Bioresource Technology Reports*. 2026;33:102548. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2026.102548>

22. Yang N, Du R, Yu N, He W, Wang Z, Du X, Chen S. Integrated sensing and communication for lettuce water-status monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2026;242:111370. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.111370>
23. Sen K, Dey S, Ganguly A, Rajak P. Artificial intelligence in aquaculture: Advancing sustainable fish farming through AI-driven monitoring, optimization, and disease management. *Aquaculture*. 2026;614:743602. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2025.743602>
24. Ellahi RM, Wood LC, Bekhit AE-DA. A multi-layer Industry 4.0 framework for ensuring halal integrity in NZ meat supply chains. *Food Control*. 2026;182:111880. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111880>
25. Asogan A, Sazali N, Veerendra AS, Samyilingam L, Aslfattahi N, Kok CK, Kadirgama K. A review on the impact of AI-enabled thermal imaging and IoT sensor fusion on early detection of mastitis in dairy cattle. *Biosensors and Bioelectronics: X*. 2026;28:100735. <https://doi.org/10.1016/j.biosx.2025.100735>
26. Kırbaç İ. AI-based automated weight prediction in cattle for herd health surveillance. *Preventive Veterinary Medicine*. 2026;247:106752. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2025.106752>
27. Aroh IM, McCutcheon G, Macartan BP, Kuneš R, Curran TP, Clarke L. Monitoring ammonia emissions in pig facilities: a comparative review of measurement technologies, monitoring protocols, and technology decision-support framework. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2026;241:111238. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.111238>
28. Fu C, Zhuang Q, Tian A. An IoT-based measurement system for the quantitative analysis of soil heavy metals integrating fractional-order signal processing and multi-task learning. *Measurement*. 2026;260:119822. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.119822>
29. Li Z. A magnetic induction network for high-resolution, real-time soil moisture monitoring in complex subsurface environments. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2026;242:111314. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.111314>
30. Malche T, Joshi M, Upadhyay GM, Soni PK. Automated tomato leaf disease detection and alert system using Internet of Things and TinyML. *Discover Internet of Things*. 2025;6:8. <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00257-8>
31. Zarboubi M, Bellout A, Chabaa S, Dliou A. Enhancing integrated pest management with IoT and YOLO-Evo: A smart, low-cost monitoring system for sustainable apple farming. *Results in Engineering*. 2026;29:108850. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108850>
32. Fedorenko V, Samoylenko I, Samoylenko V. Energy-balanced distribution of radio modules with various technical states among positions of nodes in wireless sensor networks. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*. 2021;138:153849. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2021.153849>
33. Talaat FM, Ibrahim MA, Karim AA, Elsonbaty HK, Al-Zoghby AM. IoT-Integrated robotic system for automated plant disease detection and environmental monitoring. *Scientific Reports*. 2026;16:1638. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-32624-4>
34. Dahmir F, Krisnowo A, Soehadi G, Widodo A, Appe J, Budiwati SV, Haryanto G, Taufik M, Karim S, Putera IP, Prabowo J, Dwiono A, Ilyas A. 5G utilization for smart farming to enhance productivity of sugarcane plantations in Indonesia. *Discover Sustainability*. 2025;7:86. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-02073-0>
35. Méndez B, Lamo P. IoT node for monitoring and traceability of live plants in maritime transport. *Array*. 2026;29:100621. <https://doi.org/10.1016/j.array.2025.100621>
36. Fedorenko V, Samoylenko V, Vinogradenko A, Samoylenko I, Sharipov I, Anikuev S. Mathematical Aspects of Stable State Estimation of the Radio Equipment in Terms of Communication Channel Functioning. In: Vishnevskiy VM, Samouylov KE, Kozyrev DV, editors. *Distributed Computer and Communication Networks*. Cham: Springer; 2019. p. 547-559. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36625-4_44
37. Fedorenko V, Samoylenko I, Samoylenko V. Fragmentation of data packets in wireless sensor network with variable temperature and channel conditions. *Computer Communications*. 2024;214:201-214. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2023.12.001>
38. Awlla AH, Rashid TA, Abdullah RM. A Dynamic-Weight Multi-Objective Sloth-Inspired Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks. *International Journal of Communication Systems*. 2026;39(2):e70395. <https://doi.org/10.1002/dac.70395>
39. Sennan S, S S, Somula R, Pandey D, Cho Y. A multi-objective grey wolf optimization algorithm for energy-efficient cluster-based routing in IoT-enabled WSNs. *Scientific Reports*. 2025;16:179. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-28950-2>

40. Sun W, Wang H, Qin Z, Guo X. Air–Ground Collaborative Networking and Transmission Scheduling for Opportunistic UAV-Assisted Data Collection. *IEEE Internet of Things Journal*. 2026;13(5):4931-4948. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2025.3637836>
41. Tao X, Butcher J, Cumini C, Talasila M, Montserrat SC, Sacco A, Popp M, Marchetto G, Silvestri S. AgriSmart: An IoT-enabled framework for agricultural resource optimization. *Computer Communications*. 2026;248:108416. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2026.108416>
42. Samoylenko VV. Economic and mathematical optimization of the structure of wireless sensor networks for intensive orchards. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Series "Economics, Finance and Production Management"*. 2025;66:136-145. (In Russ.).
43. Paki ZS, Yakubu BM, Boukari S, Latif R, Jamail NSM, Gital AY, Fati SM. Blockchain based precision rice farming framework using deep learning techniques. *Discover Internet of Things*. 2025;6:5. <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00264-9>
44. Jain P, Alam MS, Saini MK, Aslam R. Recent technological innovations and strategies for reducing post-harvest losses during bulk grain storage: Applications of IoT and non-destructive quality evaluation. *Journal of Stored Products Research*. 2026;116:102893. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2025.102893>
45. Chen H-C, Chen S-F, Lin S-R, Lin T-T. IoT-based automated monitoring and assessment of tea shoot density using canopy imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2026;241:111251. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.111251>
46. Samoylenko V, Fedorenko V, Samoylenko I. Comparative Analysis of Digital Platforms for Agriculture 4.0 in Russia: Current Level and Ways for Improvement. In: Samoylenko I, Rajabov T, editors. *Innovations in Sustainable Agricultural Systems, Agriculture 4.0 and Precision Agriculture, Volume 2*. Cham: Springer; 2025. p. 43-51. https://doi.org/10.1007/978-3-031-98127-2_4
47. Mamun Q, Zaman A, Ip RHL, Haque KMS. A bibliographic study of integrating IoT and geospatial modelling for sustainable smart agriculture in developed countries: Focus on Australia. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2026;241:111289. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.111289>
48. Mensah G, Opoku R, Davis F, Obeng GY, Kornyo O, Marfo D, Addai M, Dampitey J, Wetajega SD. Machine learning-assisted innovative charging strategy for e-mobility in rural communities operated by redundant energy on solar PV mini-grids. *Energy Conversion and Management: X*. 2026;30:101591. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.101591>

Информация об авторах

Владимир Валерьевич Самойленко – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инжиниринга и IT-решений Ставропольского государственного аграрного университета, Scopus ID: 57193602244, Researcher ID: C-8402-2013.

Вклад авторов:

Владимир Валерьевич Самойленко – проведение исследования, сбор, интерпретация и анализ полученных данных, утверждение окончательного варианта, принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Information about the authors

Vladimir V. Samoylenko – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Engineering and IT Solutions, Stavropol State Agrarian University, Scopus ID: 57193602244, Researcher ID: C-8402-2013.

Author contributions:

Vladimir V. Samoylenko – conducting research, data collection, analysis and interpretation, approval of the final manuscript, acceptance of responsibility for all types of the work, integrity of all parts of the paper and its final version.