

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ IoT-СЕТЕЙ ДЛЯ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

В.Н. Палаткин¹, А.И. Заревич¹

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

Аннотация: В статье представлен комплексный анализ современных подходов к построению IoT-инфраструктуры для систем точного земледелия. Детально рассмотрены принципы работы и технические характеристики ключевых типов агросенсоров: датчиков pH, электропроводности (ЕС), объёмной влажности почвы (VWC) и температуры. Проведён сравнительный анализ методов измерения, выявлены преимущества и ограничения различных конструктивных решений. Особое внимание уделено вопросам энергоэффективности узлов сбора данных, архитектурным особенностям беспроводных сетей стандарта LoRaWAN и проблемам интеграции сенсорных систем с цифровыми агроплатформами. Предложена методика оценки достоверности данных от бюджетных сенсоров и алгоритм адаптивной калибровки. В заключении сформулированы перспективы развития агро-IoT, включая интеграцию с технологиями искусственного интеллекта, спутниковым мониторингом и предиктивной аналитикой.

Ключевые слова: точное земледелие, Интернет вещей, агросенсоры, датчик pH, электропроводность почвы, влажность почвы, LoRaWAN, LPWAN, энергоэффективность, цифровизация сельского хозяйства, предиктивная аналитика.

TECHNOLOGICAL ASPECTS AND PROSPECTS OF IMPLEMENTING IoT NETWORKS FOR PRECISION FARMING

V.N. Palatkin¹, A.I. Zarevich¹

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

Abstract: The article presents a comprehensive analysis of modern approaches to building IoT infrastructure for precision farming systems. The operating principles and technical characteristics of key types of agro-sensors are examined in detail: pH sensors, electrical conductivity (EC), volumetric soil moisture (VWC), and temperature sensors. A comparative analysis of measurement methods is conducted, revealing the advantages and limitations of various design solutions. Particular attention

is paid to energy efficiency issues of data collection nodes, architectural features of LoRaWAN wireless networks, and problems of integrating sensor systems with digital agricultural platforms. A methodology for assessing data reliability from budget sensors and an adaptive calibration algorithm are proposed. The conclusion formulates prospects for the development of agro-IoT, including integration with artificial intelligence technologies, satellite monitoring, and predictive analytics.

Keywords: precision farming, Internet of Things, agro-sensors, pH sensor, soil electrical conductivity, soil moisture, LoRaWAN, LPWAN, energy efficiency, digital agriculture, predictive analytics.

Введение

Современное сельское хозяйство вступило в эпоху беспрецедентных вызовов. Рост мирового населения, требующий увеличения объемов производства продовольствия на 70% к 2050 году, изменение климата, сопровождающееся засухами и опустыниванием, а также деградация почвенных ресурсов – все это требует принципиально новых, научно-обоснованных подходов к управлению агропроизводством. Традиционные методы, основанные на усредненных нормах внесения удобрений и полива, зачастую неэффективны и приводят к перерасходу ресурсов и нанесению вреда окружающей среде.

В этом контексте технологии точного земледелия (Precision Agriculture), базирующиеся на сборе и анализе пространственно-распределенных данных о состоянии полей, становятся не просто перспективным направлением, а стратегической необходимостью для устойчивого развития отрасли. Ключевым технологическим фундаментом, обеспечивающим реализацию концепции точного земледелия, выступает Интернет вещей (IoT).

1. Архитектура IoT-систем в агрономии

Переходя к рассмотрению технической реализации, отметим, что любая современная система агро-IoT представляет собой сложную, иерархическую структуру. Типовая архитектура (рис. 1) включает в себя три основных уровня: физический уровень сенсоров и исполнительных устройств (сенсорный уровень), уровень сетевой инфраструктуры для передачи данных (сетевой уровень) и уровень обработки, хранения и визуализации информации (прикладной уровень или уровень облачных платформ).

Типовая архитектура агро-IoT представляет собой многоуровневую систему (рис. 1):

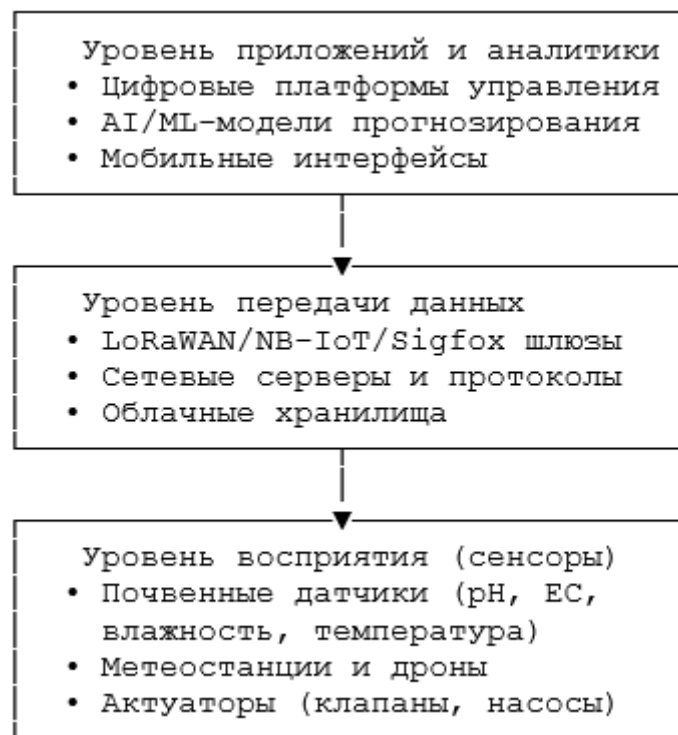


Рисунок 1 – Трёхуровневая архитектура агро-IoT системы

Как видно из схемы, ключевым элементом, от которого зависит качество и надежность работы всей системы, является сенсорный уровень. Именно здесь происходит первичный контакт с объектом измерения – почвой. Погрешности, возникшие на этом этапе, не могут быть скомпенсированы впоследствии никакими, даже самыми совершенными, алгоритмами обработки данных. Поэтому далее мы детально рассмотрим физические принципы работы, конструктивные особенности и технические характеристики основных типов агросенсоров.

2. Технический анализ агросенсоров

2.1. Датчики кислотности (рН) почвы

Измерение рН является одной из наиболее важных диагностических задач в агрономии, поскольку доступность практически всех питательных элементов для растений подчиняется строгой нелинейной зависимости от кислотности почвенного раствора (табл. 1). Отклонение рН от оптимального диапазона блокирует усвоение элементов даже при их высоком валовом содержании в почве.

Классическим и наиболее точным методом измерения рН является потенциометрия с использованием стеклянного электрода. Его работа основана на возникновении разности потенциалов на тонкой стеклянной мембране, селективной к ионам водорода. Эта зависимость описывается уравнением Нернста:

$$E = E^0 - \frac{2.303 \cdot R \cdot T}{F} \cdot pH$$

где:

- E – измеряемый потенциал, мВ;
- E^0 – стандартный потенциал электрода;
- R – универсальная газовая постоянная (8.314 Дж/(моль·К));
- T – абсолютная температура, К;
- F – постоянная Фарадея (96485 Кл/моль).

Таблица 1. Влияние pH на доступность питательных элементов.

Элемент	Оптимальный диапазон pH	Последствия отклонения
Азот (N)	6.0–7.5	Снижение нитрификации при pH < 5.5
Фосфор (P)	6.0–7.0	Образование нерастворимых соединений при pH < 5.0 или > 7.5
Калий (K)	5.5–7.5	Конкурентное поглощение с Ca ²⁺ и Mg ²⁺ при экстремальных значениях
Микроэлементы	5.5–6.5	Дефицит Fe, Mn, Zn при pH > 7.0

При 25°C температурный коэффициент составляет ≈59.16 мВ/pH. Это означает, что изменение температуры всего на 1°C может привести к погрешности в 0.2 единицы pH, если не вносить поправку. Данный факт делает обязательным наличие функции автоматической температурной компенсации в полевых pH-метрах, работающих в условиях суточных и сезонных колебаний температур.

Сравнение технологий pH-сенсоров.

Таблица 2. Сравнительная характеристика технологий измерения pH

Параметр	Стеклянный электрод	ISFET	Твердотельный
Точность	±0.01–0.1 pH	±0.05–0.2 pH	±0.1–0.3 pH
Стабильность	Высокая (при калибровке)	Средняя	Низкая
Срок службы	1–3 года	6–18 месяцев	3–12 месяцев
Стоимость	Высокая	Очень высокая	Низкая
Устойчивость к механическим воздействиям	Низкая	Средняя	Высокая

Выбор конкретного типа рН-метра, как следует из таблицы 2, должен определяться задачами мониторинга. Для агрономических исследований, где требуется эталонная точность, оптимальны стеклянные электроды. Для создания плотных сетей датчиков на коммерческих полях более прагматичным решением могут стать твердотельные сенсоры, несмотря на их ограниченный ресурс, так как это окупается возможностью массового охвата территории.

Более того, кислотность почвы напрямую влияет на растворимость солей, а следовательно, и на показания ЕС-сенсоров. В кислых или щелочных почвах многие питательные элементы переходят в недоступные формы, что искажает картину «реального» плодородия, отражаемую электропроводностью. Именно поэтому интерпретацию данных ЕС всегда рекомендуется проводить в комплексе с показаниями рН-метров.

Однако для полноценной оценки состояния почвы данных только о кислотности недостаточно. Не менее важным показателем, особенно при управлении поливом и внесении удобрений, является электропроводность. Перейдем к анализу технологий измерения этого параметра.

2.2. Датчики электропроводности (ЕС)

Если рН показывает химическое состояние почвы, то электропроводность (ЕС) является интегральным показателем ее «плодородия» в части минерального питания. ЕС коррелирует с концентрацией растворимых солей, в том числе ионов азота, калия, кальция, магния, и широко используется для картирования полей и зонирования территории.

Физически электропроводность почвы рассчитывается по формуле:

$$EC = \frac{1}{R_{soil} \cdot K} \cdot f(T)$$

где K – геометрическая константа электродов, $f(T)$ – температурная компенсация (обычно приводится к 25°C).

Однако на пути практической реализации этого измерения стоит серьезная проблема – большой динамический диапазон изменения сопротивления почвы: от 10 Ом (сильно увлажненная засоленная почва) до 10 МОм (сухая песчаная почва). Измерять такие сопротивления с приемлемой точностью одной и той же схемой невозможно. Для решения этой задачи применяется метод адаптивного усиления или автоматического выбора диапазона, который можно описать следующим алгоритмом:

Алгоритм адаптивного измерения ЕС:

1. Предварительное измерение с низким током (I_1)
2. Если $V_{sense} < V_{min} \rightarrow$ увеличить ток в $10\times$
3. Если $V_{sense} > V_{max} \rightarrow$ уменьшить ток в $10\times$
4. Повторить измерение с оптимальным током
5. После получения значения ЕС необходимо привести его к стандартной температуре (обычно 25°C), так как электропроводность растворов сильно зависит от температуры. Коррекция проводится по формуле:

$$EC_{25} = EC_t / [1 + \alpha \cdot (t - 25)]$$

где $\alpha \approx 0.019\text{--}0.023\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ для почвенных растворов

Реализация такого алгоритма на микроконтроллере сенсорного узла позволяет автоматически подстраиваться под изменяющиеся условия почвы (например, после полива или дождя сопротивление может упасть в тысячи раз), обеспечивая точность измерений во всём рабочем диапазоне без участия человека.

2.3. Датчики влажности почвы

Влажность – это, пожалуй, самый востребованный параметр в системах автоматического полива. Среди множества методов измерения влажности в современных автономных IoT-системах доминируют ёмкостные датчики благодаря их низкому энергопотреблению, отсутствию движущихся частей и приемлемой точности. Принцип их действия основан на измерении диэлектрической проницаемости среды ϵ , которая для воды ($\epsilon \approx 80$) значительно выше, чем для сухого скелета почвы ($\epsilon \approx 3\text{--}5$) и воздуха ($\epsilon = 1$).

Связь между измеренной диэлектрической проницаемостью и объемной влажностью (θ , $\text{см}^3/\text{см}^3$) не является линейной. Наиболее известной является эмпирическая формула, предложенная Торр и соавторами:

$$\sqrt{\epsilon} = 3.03 + 9.3\theta + 146.0\theta^2 - 76.7\theta^3$$

Однако универсальность этой формулы ограничена. На точность измерения существенно влияют факторы, специфичные для конкретного поля:

- Содержание органического вещества;
- Гранулометрический состав и плотность почвы;
- Температура;
- Концентрация солей (влияние на диэлектрические потери ϵ воды).

Рекомендуется проводить локальную калибровку для каждого типа почв:

$$\theta_{corr} = a \cdot \theta_{raw} + b$$

где коэффициенты a , b определяются по эталонным значениям путем сопоставления сырых показаний датчика с эталонными значениями влажности, полученными термостатно-весовым (гравиметрическим) методом для образцов почвы из мест установки датчиков.

На практике для определения коэффициентов a и b достаточно отобрать 5-10 образцов почвы в диапазоне от сухой до полностью насыщенной влагой, провести гравиметрический анализ и построить линейную регрессию. Это позволит снизить погрешность измерений с $\pm 5-7\%$ до $\pm 1-2\%$.

2.4. Температурные датчики

Измерение температуры почвы необходимо не только как самостоятельный агрономический параметр (влияющий на скорость прорастания семян и активность микрофлоры), но и как обязательный компонент компенсационных алгоритмов для pH- и ЕС-сенсоров, как было показано выше. В этом качестве удобно использовать цифровые датчики типа DS18B20. Они обеспечивают заводскую точность $\pm 0.5^\circ\text{C}$ при программно-выбираемом разрешении до 0.0625°C . Важнейшим преимуществом для распределенных систем является возможность подключения до 127 таких датчиков на одну двухпроводную шину 1-Wire, что позволяет значительно снизить стоимость кабельной инфраструктуры и упростить масштабирование сети.

3. Беспроводные технологии передачи данных

После того, как данные от сенсоров получены и оцифрованы, возникает задача их надежной и энергоэффективной передачи с удаленных полевых участков на центральный сервер. Выбор конкретной беспроводной технологии является ключевым компромиссом между дальностью, скоростью, энергопотреблением и стоимостью.

3.1. Сравнение LPWAN-технологий

Для задач мониторинга больших территорий с рассредоточенными объектами, где требуется передавать небольшие объемы данных несколько раз в сутки, оптимальным классом решений являются технологии LPWAN (Low-Power Wide-Area Network). Рассмотрим их основные характеристики в сравнении.

Как видно из таблицы, каждая технология имеет свою нишу. Однако для большинства задач автономного мониторинга полей наиболее сбалансирован-

ным решением на сегодняшний день является LoRaWAN. Она обеспечивает уникальное сочетание большой дальности, низкого энергопотребления (а значит, многолетней работы от батарей) и использования бесплатного нелицензируемого частотного диапазона.

Таблица 3. Сравнительный анализ LPWAN-технологий для агро-IoT

Параметр	LoRaWAN	NB-IoT	Sigfox	Zigbee
Дальность (сельская местность)	5–15 км	1–10 км	10–40 км	0.1–1 км
Скорость передачи	0.3–50 кбит/с	20–250 кбит/с	100 бит/с	20–250 кбит/с
Потребление (передача)	30–100 мА	50–150 мА	20–50 мА	15–40 мА
Срок работы от батареи	5–10 лет	3–7 лет	5–10 лет	1–3 года
Стоимость узла	\$10–30	\$15–40	\$20–35	\$5–15
Лицензирование	ISM (бесплатно)	Лицензированные частоты	ISM	ISM

3.2. Особенности развёртывания LoRaWAN

Несмотря на очевидные преимущества, успешное развёртывание сети LoRaWAN требует тщательного планирования, основанного на расчетах бюджета радиоканала. Бюджет канала определяет, какая мощность сигнала достигнет приемника, и рассчитывается по формуле:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_{fs} - L_{other}$$

где:

- P_{tx} – мощность передатчика (до +20 дБм);
- G_{tx} , G_{rx} – усиление антенн;
- L_{fs} – потери в свободном пространстве: $20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32.44$ (d в км, f в МГц);
- L_{other} – дополнительные потери (растительность, рельеф: 10–30 дБ).

Для частоты 868 МГц и дальности 10 км: $L_{fs} \approx 112$ дБ, что требует чувствительности приёмника не хуже –130 дБм (достижимо при SF12 в LoRa).

Для частоты 868 МГц и дальности 10 км потери в свободном пространстве L_{fs} составят ≈ 112 дБ. Учитывая, что мощность передатчика обычно составляет +14 дБм, а чувствительность приемника LoRa может достигать –137 дБм при использовании максимального коэффициента расширения спектра (SF12), теоретический запас в 25–30 дБ позволяет компенсировать дополнительные потери на растительности и рельефе (L_{other}), которые могут достигать 10–30 дБ.

Рекомендации по планированию сети

1. Размещать шлюзы на возвышенностях для минимизации затенения
2. Использовать адаптивный коэффициент расширения (ADR) для оптимизации энергопотребления
3. Реализовать резервирование: каждый узел должен «видеть» минимум 2 шлюза

Таким образом, при грамотном планировании сети LoRaWAN способна обеспечить надёжную связь на расстояниях до 10-15 км даже в условиях пересечённой местности с лесополосами, что полностью покрывает потребности большинства сельскохозяйственных предприятий.

4. Повышение достоверности данных

Как было отмечено во введении, одним из главных барьеров на пути внедрения агро-IoT является сомнение в достоверности данных, получаемых от недорогих, массовых сенсоров. Дрейф характеристик, загрязнение электродов, несовершенство калибровки – все это может приводить к ошибкам, способным свести на нет все преимущества цифрового управления. Рассмотрим методы борьбы с этими явлениями.

4.1. Методика валидации бюджетных сенсоров

Для обеспечения качества данных предлагается внедрение обязательного трёхэтапного протокола валидации, подлежащего применению на всём протяжении жизненного цикла сенсорной системы.

1. Лабораторная верификация. На этапе ввода в эксплуатацию каждый датчик (либо репрезентативная выборка из партии) подвергается тестированию в контролируемых условиях. Показания сенсора сопоставляются с эталонным лабораторным оборудованием во всём рабочем диапазоне значений – для различных буферных растворов (рН), эталонных растворов солей (ЕС) или почвенных образцов с известной влажностью. Такая процедура позволяет отбраковать неисправные изделия и получить исходные калибровочные коэффициенты.

2. Полевая калибровка. После установки на поле, по истечении 1–2 недель стабилизации, производится отбор почвенных проб в непосредственной близости от каждого датчика. Результаты лабораторного анализа этих проб принимаются за «золотой стандарт», с которым сравниваются текущие показания сенсоров. Обнаруженные систематические расхождения используются для уточнения калибровочных зависимостей.

3. Перекрёстная проверка (кросс-валидация). В процессе эксплуатации аномалии выявляются благодаря избыточности данных и пространственной корреляции. Если, например, показания одного датчика влажности начинают резко расходиться с показаниями двух-трёх соседних датчиков при отсутствии осадков и полива, это с высокой вероятностью сигнализирует о его неисправности. Для автоматизации такого выявления применяются статистические методы – анализ z-оценок или межквартильного размаха (IQR).

Рекомендуемая периодичность выполнения процедур: лабораторная верификация – однократно при вводе в эксплуатацию; полевая калибровка – ежегодно перед началом сезона; перекрёстная проверка – ежедневно в автоматическом режиме.

4.2. Алгоритм адаптивной компенсации дрейфа

Помимо внезапных отказов, существует проблема постепенного дрейфа параметров сенсоров, особенно химических (рН-электроды). Для компенсации медленного дрейфа в долгосрочном мониторинге можно применять алгоритмы адаптивной фильтрации. Мы предлагаем использовать рекурсивную экспоненциально-взвешенную коррекцию, которая подстраивает базовую линию с учетом редко проводимых контрольных измерений:

$$C_t = \alpha \cdot C_{t-1} + (1 - \alpha) \cdot (M_t - B_t)$$

где:

- C_t – скорректированное значение;
- M_t – сырое измерение;
- B_t – оценённый дрейф базовой линии;
- α – коэффициент сглаживания (0.9–0.99).

Коэффициент сглаживания α выбирается близким к 1 (например, 0.95–0.99), что обеспечивает высокую инерционность фильтра и защиту от случайных выбросов, но при этом позволяет медленно подстраиваться под дрейф.

5. Интеграция с аналитическими платформами

Конечная цель внедрения рассмотренных технологий – это не просто сбор данных, а превращение их в ценный ресурс для управления сельскохозяйственным производством. Современные агро-IoT системы эволюционируют от простого описательного мониторинга (что происходит?) к диагностическому (почему происходит?), а затем и к предиктивному (что произойдет?) и, наконец, к прескриптивному (что нужно сделать?) управлению.

Например, на основе данных об осадках (метеостанция), текущей влажности почвы (IoT-сенсоры) и прогноза погоды модель машинного обучения может с вероятностью до 85% предсказать оптимальный день для начала посевных работ или дать рекомендацию отложить полив на 3 дня в связи с ожидаемыми осадками, экономя до 30% воды.

Ключевые направления такой эволюции:

- Машинное обучение для прогнозирования: модели на основе градиентного бустинга и рекуррентных нейросетей для предсказания динамики влажности, риска заболеваний

- Цифровые двойники полей: создание виртуальных моделей, отражающих пространственную вариабельность параметров и позволяющих тестировать сценарии управления

- Интеграция с дистанционным зондированием: совместный анализ данных IoT-сенсоров и спутниковых индексов (NDVI, NDWI) для повышения точности рекомендаций

Заключение

Проведенный комплексный анализ современных технологий и подходов к построению IoT-сетей для точного земледелия позволяет сделать вывод о высоком потенциале их применения для повышения эффективности и устойчивости агропроизводства. Однако путь к массовому внедрению лежит через решение ряда технических и методологических задач. Резюмируя вышесказанное, можно выделить ключевые факторы успеха внедрения:

Перспективы развития связаны с конвергенцией IoT, искусственного интеллекта и спутниковых технологий, что позволит создать адаптивные агроэко-системы, способные автоматически оптимизировать использование ресурсов в ответ на изменяющиеся условия. Для ускорения внедрения необходимы стандартизация интерфейсов сенсоров, развитие отечественных решений в области агроэлектроники и подготовка кадров, сочетающих агрономические и IT-компетенции.

Реализация описанных подходов позволит не только повысить эффективность сельскохозяйственного производства, но и сделать его более экологичным и устойчивым к климатическим изменениям, что соответствует глобальным целям устойчивого развития.

Список литературы

1. Гончаров Р.Д. Перспективы применения IoT-технологий в мониторинге сельскохозяйственной техники: разработка и апробация платформы «Агротрек» // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2025. – № 3 (59).
2. Сибиряев А.С., Зазимко В.Л., Додов Р.Х. Цифровая трансформация и цифровые платформы в сельском хозяйстве // Вестник НГИЭИ. – 2020. – № 12.
3. Кобозева Е.М., Добрик С.Г. Влияние технологий интернета вещей на трансформационные процессы в различных отраслях экономики // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 5: Экономика. – 2025. – № 1 (355).
4. Поляков В.В. Экоориентированная цифровизация агропроизводственной деятельности в рамках концепта «Сельское хозяйство 4.0» // Экономика и экология территориальных образований. – 2023. – № 1.
5. Рыбин В.Г., Пестерев Д.О., Копец Е.Е., Тутуева А.В. Встраиваемая система удаленного мониторинга состояния пасеки // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2018. – № 97.
6. Даюб Н. Уровень использования цифровых технологий в сельском хозяйстве России // Друкеровский вестник. – 2023. – № 3 (53).
7. Назаров Д.М., Бегичева С.В., Копнин А.А. Большие языковые модели (LLM): новый этап цифровой трансформации агропромышленного комплекса России // Аграрный вестник Урала. – 2025. – № 7.
8. Москалев С.М., Клименок-Кудинова Н.В. Искусственный интеллект и интернет вещей как инновационные методы совершенствования агропромышленного сектора // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2018. – № 52.
9. Mishra D., Singh R., Tripathi S. IoT-based soil monitoring systems for smart agriculture: A comprehensive review // Computers and Electronics in Agriculture. – 2022. – Vol. 198. – P. 107099.
10. Gutiérrez J., Villa-Medina J. F., Nieto-Garibay A., Porta-Gándara M. Á. Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2014. – Vol. 63, No. 1. – P. 166–176.

References

1. Goncharov R.D. Prospects for the Application of IoT Technologies in Agricultural Machinery Monitoring: Development and Testing of the Agrotrack Platform // Bulletin of the Omsk State Agrarian University. – 2025. – No. 3 (59).
2. Sibiryayev A.S., Zazimko V.L., Dodov R.Kh. Digital Transformation and Digital Platforms in Agriculture // Bulletin of the NGIEE. – 2020. – No. 12.
3. Kobozeva E.M., Dobrik S.G. The Impact of Internet of Things Technologies on Transformation Processes in Various Economic Sectors // Bulletin of the Adyghe State University. Series 5: Economics. – 2025. – No. 1 (355).
4. Polyakov V.V. Eco-oriented Digitalization of Agro-Production Activities within the Framework of the "Agriculture 4.0" Concept // Economics and Ecology of Territorial Entities. – 2023. – No. 1.
5. Rybin V.G., Pesterev D.O., Kopets E.E., Tutueva A.V. Embedded System for Remote Monitoring of Beehive Condition // Technologies and Technical Means of Mechanized Production of Crop and Livestock Products. – 2018. – No. 97.
6. Dayub N. The Level of Use of Digital Technologies in Russian Agriculture // Drukerovsky Bulletin. – 2023. – No. 3 (53).
7. Nazarov D.M., Begicheva S.V., Kopnin A.A. Large Language Models (LLM): A New Stage in the Digital Transformation of Russia's Agro-Industrial Complex // Agrarian Bulletin of the Urals. – 2025. – No. 7.
8. Moskalev S.M., Klimenok-Kudinova N.V. Artificial Intelligence and the Internet of Things as Innovative Methods for Improving the Agro-Industrial Sector // Izvestiya of the St. Petersburg State Agrarian University. – 2018. – No. 52.
9. Mishra D., Singh R., Tripathi S. IoT-based soil monitoring systems for smart agriculture: A comprehensive review // Computers and Electronics in Agriculture. – 2022. – Vol. 198. – P. 107099.
10. Gutiérrez J., Villa-Medina J. F., Nieto-Garibay A., Porta-Gándara M. Á. Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2014. – Vol. 63, No. 1. – P. 166–176.