

Дата поступления рукописи в редакцию: 07.07.2026 г.

DOI: 10.24412/2782-3849-2026-7-531-538

Дата принятия рукописи в печать: 11.07.2026 г.

СКВОРЦОВА Екатерина Геннадьевна,

кандидат экономических наук, ФГБОУ ВО Уральский ГАУ,

e-mail: uralmash91@list.ru

СОЗДАНИЕ ЕДИНЫХ ЭКОСИСТЕМ ДАННЫХ И ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ

Аннотация. В статье рассматриваются теоретические и практические аспекты создания единых экосистем данных и цифровых двойников в животноводстве как ключевого направления цифровой трансформации отрасли. На основе анализа современных научных публикаций (2024–2026 гг.) определены архитектурные принципы построения цифровых двойников, включая многоуровневые и микросервисные подходы. Проанализированы методы интеграции разнородных источников данных: сенсоров Интернета вещей (IoT), систем компьютерного зрения, носимых устройств, спектроскопии молока, геномной информации и данных о кормлении. Рассмотрены проблемы верификации данных, обеспечения интероперабельности и кибербезопасности. Выявлен разрыв между технологическими обещаниями цифровых двойников и эмпирической доказательной базой: показано, что на сегодняшний день в коммерческих молочных и птицеводческих системах не развернуты полноценные цифровые двойники инженерного уровня. Предложены пути преодоления существующих барьеров, включая создание открытых и модульных архитектур, стандартизацию метаданных и разработку гибридных моделей, сочетающих физическое и статистическое моделирование. Сделан вывод о том, что успешная реализация цифровых двойников в животноводстве требует комплексного решения технических, экономических, этических и социальных проблем, а также разработки универсальных метрик для оценки их эффективности.

Ключевые слова: цифровой двойник, экосистема данных, точное животноводство, Интернет вещей, машинное обучение, интеграция данных, верификация, интероперабельность, молочное животноводство, устойчивое развитие.

SKVORTSOVA Ekaterina Gennadievna,

Candidate of Economic Sciences, FSBEI HE Ural GAU

CREATING UNIFIED DATA ECOSYSTEMS AND DIGITAL TWINS IN LIVESTOCK FARMING

Annotation. This article examines the theoretical and practical aspects of creating unified data ecosystems and digital twins in livestock farming as a key direction of the industry's digital transformation. Based on an analysis of current scientific publications (2024–2026), the architectural principles of building digital twins are identified, including multi layered and microservices approaches. Methods for integrating heterogeneous data sources are analyzed: Internet of Things (IoT) sensors, computer vision systems, wearable devices, milk spectroscopy, genomic information, and feeding data. The problems of data verification, ensuring interoperability, and cybersecurity are considered. A gap is revealed between the technological promises of digital twins and the empirical evidence base: it is shown that, to date, fully fledged engineering level digital twins have not been deployed in commercial dairy and poultry systems. Ways to overcome the existing barriers are proposed, including the creation of open and modular architectures, metadata standardization, and the development of hybrid models that combine physical and statistical modeling. It is concluded that the successful implementation of digital twins in livestock farming requires a comprehensive solution to technical, economic, ethical, and social problems, as well as the development of universal metrics for evaluating their effectiveness.

Key words: digital twin, data ecosystem, precision livestock farming, Internet of Things, machine learning, data integration, verification, interoperability, dairy farming, sustainable development.

Введение

Современное животноводство сталкивается с беспрецедентным комплексом вызовов. Рост численности населения мира, урбанизация и повышение уровня благосостояния приводят к увеличению спроса на продукты животного происхождения. По прогнозам Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), глобальный спрос на продукты животного происхождения вырастет на 60–70% к середине XXI века. Одновременно с этим возрастают требования к устойчивости производства, благополучию животных, снижению выбросов парниковых газов и обеспечению продовольственной безопасности.

В ответ на эти вызовы формируется новая парадигма — точное животноводство (Precision Livestock Farming, PLF), основанное на использовании сенсоров, Интернета вещей (IoT) и методов анализа данных для повышения эффективности управления животными. Ключевым элементом этой парадигмы становится технология цифровых двойников (Digital Twins, DT) — динамических виртуальных реплик физических объектов и процессов, поддерживаемых в синхронизации с реальностью через непрерывные потоки данных.

Цифровые двойники в животноводстве представляют собой виртуальные копии не только отдельных животных, но и целых фермерских систем — от коров и кормов до зданий и оборудования. Они позволяют моделировать, прогнозировать и оптимизировать производственные процессы, обеспечивая принятие решений на основе данных в режиме реального времени. Однако, несмотря на значительный интерес и активные исследования, практическое внедрение полноценных цифровых двойников в коммерческом животноводстве остается ограниченным.

Цель настоящей работы — систематический анализ современного состояния и перспектив создания единых экосистем данных и цифровых двойников в животноводстве. В статье рассматриваются архитектурные подходы, методы интеграции данных, проблемы верификации и применения цифровых двойников, а также определяются направления будущих исследований.

Цифровой двойник представляет собой цифровую реплику физического объекта, системы или процесса, которая поддерживается в непрерывной двунаправленной связи с физическим оригиналом через обмен данными в реальном времени. В контексте животноводства физическими объектами могут выступать отдельные животные, группы животных, технологическое оборудование,

производственные помещения или ферма в целом.

Ключевым отличием цифрового двойника от традиционных моделей и симуляций является его динамическая природа. В отличие от «моделей снимкового состояния», которые показывают, что должно происходить в среднем, цифровой двойник выступает как «живое зеркало», динамически предсказывающее, что происходит прямо сейчас и что произойдет с каждым животным при различных изменениях.

В научной литературе выделяют несколько уровней зрелости цифровых двойников. В контексте животноводства важно различать:

Цифровые модели — статические представления, не обновляемые в реальном времени.

Цифровые тени — односторонние реплики, получающие данные от физического объекта, но не воздействующие на него.

Цифровые двойники — полноценные двунаправленные системы с обратной связью, позволяющие не только моделировать, но и оптимизировать физические процессы.

Критическое исследование, проведенное Нетираджаном (2026), показывает, что «ни одного полностью реализованного цифрового двойника инженерного уровня не развернуто в коммерческих молочных или птицеводческих системах сегодня». Существующие платформы лучше описывать как «почти-цифровые-двойниковые системы» с частичным сенсорным охватом и моделированием, прототипами, вдохновленными цифровыми двойниками, или системами поддержки принятия решений, которые часто маркируются как двойники, но не имеют непрерывной синхронизации и управления с обратной связью.

Цифровая трансформация животноводства проходит несколько этапов. Первоначально данные собирались изолированно — отдельно по кормлению, надоям, здоровью животных, генетике. Следующий этап характеризовался интеграцией данных в рамках отдельных подсистем. Современный этап предполагает создание единых экосистем данных, где разнородные информационные потоки объединяются в целостную картину.

Под экосистемой данных в животноводстве понимается совокупность взаимосвязанных источников данных, технологий их сбора, хранения, обработки и анализа, а также организационных и правовых механизмов, обеспечивающих эффективное использование информации для принятия решений. Как отмечается в исследовании, посвященном цифровизации свиноводства, «интеграция данных из множества источников позволяет

генерировать стратегическую информацию высокой ценности».

Современные подходы к созданию экосистем данных для цифровых двойников в животноводстве основываются на многоуровневых архитектурах. В систематическом обзоре 108 публикаций (2021–2025 гг.) предложена многослойная архитектура цифрового двойника, которая отображает технические и социально-этические проблемы на конкретные архитектурные механизмы и измеримые метрики оценки.

Эта архитектура включает следующие уровни:

Уровень сенсоров и сбора данных — охватывает все источники первичной информации: IoT-датчики, носимые устройства, системы компьютерного зрения, микрофоны для акустического анализа, газовые детекторы и другие.

Уровень передачи и предварительной обработки — обеспечивает сбор, фильтрацию, очистку и агрегацию данных с возможностью обработки на периферии (edge computing).

Уровень хранения и управления данными — включает облачные и локальные хранилища, системы управления базами данных, обеспечивающие масштабируемость и доступность.

Уровень моделирования и аналитики — реализует физико-информированные модели, модели машинного обучения и гибридные подходы для прогнозирования и оптимизации.

Уровень принятия решений и визуализации — предоставляет интерфейсы для фермеров, ветеринаров и управленцев, а также механизмы обратной связи с физическими системами.

В экспериментальных сценариях было показано, что микросервисная реализация такой архитектуры повышает производительность на 35%, а использование технологии распределенного реестра (блокчейн) для мониторинга сокращает время обнаружения нарушений на 65%.

Важным направлением развития является создание открытых платформ для цифровых двойников. Примером служит фреймворк IUMENTA (лат. «скот»), разработанный в Вагенингенском университете. IUMENTA использует возможности Открытой платформы цифровых двойников (Open Digital Twin Platform, ODTP) и продвинутых программных сенсоров для создания адаптивных цифровых реплик животных. Фреймворк интегрирует данные из различных экспериментов в динамическую экосистему, отслеживая энергетический баланс животного, метаболические показатели, потребности в питании, эмоциональное состояние

и общее благополучие.

Особого внимания заслуживает система EnergyTag — программный сенсор нового поколения для мониторинга энергозатрат в реальном времени, обеспечивающий непрерывное обновление и персонализацию цифрового двойника энергетического баланса.

Проблема интероперабельности (совместимости) остается одной из ключевых. Исследования показывают, что внедрение цифровых двойников в сельском хозяйстве требует сбора широкого спектра данных, принадлежащих фермерам, животноводам и участникам продовольственной цепочки. Стандартизация форматов данных, семантических моделей и протоколов обмена является необходимым условием для создания по-настоящему интегрированных экосистем.

Полноценный цифровой двойник в животноводстве должен интегрировать данные из множества источников:

Данные сенсоров окружающей среды — температура, влажность, концентрация аммиака и углекислого газа, освещенность.

Данные носимых устройств — акселерометры, гироскопы, датчики частоты сердечных сокращений, температуры тела, жвачной активности.

Данные компьютерного зрения — видеонаблюдение для распознавания индивидуальных животных, классификации поведения (стояние, сидение, лежание на груди, лежание на боку).

Данные о кормлении — состав кормов, потребление, конверсия корма.

Данные о продуктивности — надой молока, состав молока (жир, белок, соматические клетки), привесы.

Геномные данные — генетическая информация для селекционных программ.

Ветеринарные данные — история заболеваний, лечения, профилактических мероприятий.

Данные о поведении — паттерны активности, социальные взаимодействия в стаде.

Интеграция этих разнородных данных, как отмечается в исследовании по точному животноводству, позволяет создавать «цифровые двойники — динамические виртуальные реплики физических ферм, позволяющие осуществлять сложную, проактивную оптимизацию».

Основой формирования данных для цифровых двойников являются технологии Интернета вещей. В животноводстве применяются следующие категории сенсоров:

Датчики окружающей среды — измеряют микроклимат в помещениях, качество воздуха, освещенность.

Носимые датчики на животных — ошейники, ушные бирки, ножные датчики, жвачные болюсы для мониторинга активности, температуры, пульса, жвачки и потребления корма.

Системы автоматического взвешивания — для контроля привесов.

Доильные роботы и системы учета молока — обеспечивают данные о надое, составе молока, электропроводности (индикатор мастита).

Системы компьютерного зрения — камеры для мониторинга поведения, упитанности, хромоты.

Как подчеркивается в обзоре Brown-Brandl и Tao (2025), «интеграция данных в реальном времени, собранных с сенсоров PLF, и цифровых двойников может трансформировать животноводство, делая его более эффективным и устойчивым».

Цифровые двойники открывают новые возможности для высокопроизводительного фенотипирования — массового сбора данных о фенотипических характеристиках животных. Как отмечается в исследовании по большим данным в животноводстве, «данные, генерируемые на умных животноводческих фермах, увеличили сложность и разнообразие фенотипов».

Современные подходы позволяют в автоматическом режиме собирать данные о поведении, продуктивности, здоровье и благополучии тысяч животных, создавая беспрецедентные по объему и детализации массивы данных для генетической оценки и селекции.

Перспективным направлением является использование данных дистанционного зондирования Земли для мониторинга пастбищных систем и оценки экологического следа животноводства. Как отмечается в публикации о Национальном цифровом двойнике Австралии, «новая суверенная космическая возможность, оснащенная ИИ, поможет фермерам и политикам принимать более быстрые стратегические решения». Спутниковые данные позволяют оценивать состояние пастбищ, доступность кормов и выбросы парниковых газов на уровне ферм.

Качество исходных данных является критическим фактором, определяющим надежность цифровых двойников. Исследования показывают, что «необходимость в высококачественных данных, всеобъемлющих мерах по защите данных и интеграции через различные источники данных» является ключевым условием точной и эффективной реализации цифровых двойников.

Проблемы качества данных в животноводстве включают:

Пропуски данных — из-за отказов сенсоров, потери связи, проблем с питанием.

Шум и выбросы — артефакты измерений, вызванные движением животных, электромагнитными помехами.

Несогласованность форматов — различные производители оборудования используют разные протоколы и форматы данных.

Задержки передачи — данные могут поступать с существенной задержкой, что снижает ценность для принятия решений в реальном времени.

Методы очистки и верификации данных включают как простые детерминированные правила (отбраковка значений за пределами биологических норм), так и сложные интеллектуальные системы на основе машинного обучения для обнаружения аномалий.

Как показано в систематическом обзоре по цифровым двойникам в сельском хозяйстве, семантическое представление и механизмы интероперабельности являются ключевыми факторами успешного внедрения. Стандартизация метаданных, разработка общих онтологий для животноводства и создание универсальных API для обмена данными — необходимые шаги для построения интегрированных экосистем.

Важным направлением является создание «доверенных и интероперабельных систем обмена данными с использованием семантического управления и федеративных графов знаний». Такой подход позволяет обеспечивать совместимость между различными системами и платформами при сохранении контроля над данными со стороны их владельцев.

Вопросы кибербезопасности и защиты данных становятся все более актуальными по мере цифровизации животноводства. Как отмечается в исследовании многослойной архитектуры цифровых двойников, «масштабируемость и интероперабельность имеют высокое операционное воздействие и умеренную решаемость, тогда как безопасность данных и этические проблемы остаются серьезными барьерами на практике».

Среди основных угроз:

Несанкционированный доступ к данным о животных и производственных процессах.

Компрометация систем управления, ведущая к неправильным решениям.

Нарушение конфиденциальности данных фермеров и владельцев животных.

Технология распределенного реестра (блокчейн) рассматривается как перспективное решение для обеспечения проверяемости и доверия в системах точного животноводства.

Одним из наиболее перспективных

применений цифровых двойников является мониторинг здоровья животных и ранняя диагностика заболеваний. Как отмечается в обзоре по цифровым двойникам в управлении цепочками поставок животноводства, цифровые двойники эффективны в «мониторинге здоровья, профилактике заболеваний, анализе поведения и восприятия, экологическом контроле».

Цифровые двойники позволяют:

Обнаруживать отклонения в поведении, активности, потреблении корма и воды на ранних стадиях заболевания.

Прогнозировать риск заболеваний на основе комбинации данных.

Оптимизировать графики вакцинации и лечения.

Снижать использование антибиотиков за счет более точной и своевременной диагностики.

Исследования показывают, что системы компьютерного зрения в сочетании с цифровыми двойниками могут классифицировать до семи типов поведения животных в коммерческих условиях.

Точное кормление является ключевым направлением применения цифровых двойников. Физико-информированные цифровые двойники позволяют прогнозировать тепловой стресс у животных и оптимизировать рационы. Как отмечается в исследовании, цифровые двойники могут «предсказывать физиологическое и физическое состояние животных и поведение на основе входных данных, что ведет к лучшему пониманию поведения животных, потребностей в питании, физиологического статуса или экологических стрессоров».

Системы автоматической корректировки рационов на основе данных индивидуального мониторинга позволяют повысить молочную продуктивность на 8% и более. Цифровые двойники также используются для прогнозирования конверсии корма и оптимизации составов рационов.

Цифровые двойники предоставляют инструменты для управления стадом на качественно новом уровне. Они позволяют:

Прогнозировать тепловые циклы для оптимизации осеменения.

Оценивать долголетие и продуктивность животных.

Моделировать динамику стада и оптимизировать структуру.

Планировать выбраковку и замену поголовья.

Как отмечается в исследовании по свиноводству, цифровые двойники позволяют «оценивать ключевые параметры, влияющие на долголетие свиноматок и выживаемость поросят в период лактации».

Цифровые двойники находят применение в управлении цепочками поставок животноводческой продукции. Они позволяют:

Отслеживать продукцию от фермы до потребителя.

Оптимизировать логистику и снижать потери.

Оценивать углеродный след продукции.

Обеспечивать прозрачность и прослеживаемость.

Как подчеркивается в исследовании, «цифровые двойники также предлагают мощный инструмент для управления экологическим воздействием животноводства». Они позволяют в реальном времени мониторить и контролировать выбросы парниковых газов за счет оптимизации производственных процессов и использования ресурсов.

Особого внимания заслуживает применение цифровых двойников для мониторинга и снижения выбросов парниковых газов в животноводстве. Как отмечается в исследовании по энерго-осознанным цифровым двойникам для молочного животноводства, «цифровой двойник становится лабораторией принятия решений для фермы и, в конечном счете, ее операционной системой, интеллектуальным слоем, который координирует животных».

Цифровые двойники позволяют интегрировать данные о поведении животных, микроклимате, составе кормов, производстве молока, выбросах парниковых газов и энергопотреблении в единую эволюционирующую систему.

Несмотря на значительный прогресс, внедрение цифровых двойников в животноводстве сталкивается с серьезными техническими проблемами:

Масштабируемость — системы, работающие на отдельных животных или небольших группах, сложно масштабировать на уровень коммерческих ферм с тысячами голов.

Надежность сенсоров — датчики должны работать в сложных условиях (влажность, пыль, агрессивная среда, физическое воздействие животных).

Связность — во многих сельских районах отсутствует устойчивое интернет-соединение.

Энергопотребление — автономные датчики требуют частой замены батарей или подзарядки.

Стоимость внедрения — капитальные и операционные затраты на цифровизацию ферм остаются высокими.

Как отмечается в критическом обзоре по цифровым двойникам для коров и кур, «систематическая отчетность о частоте отказов, простоях и отказе от технологий почти

отсутствует, что оставляет неопределенности относительно долгосрочной надежности».

Внедрение цифровых двойников требует значительных инвестиций в оборудование, программное обеспечение, инфраструктуру и обучение персонала. Для многих фермеров, особенно в развивающихся странах, эти затраты непосильны. Как показывают исследования, «барьеры внедрения сохраняются по техническим, экономическим и социальным измерениям».

Внедрение цифровых двойников в животноводстве порождает ряд социально-этических вопросов:

Благополучие животных — не вызывает ли постоянный мониторинг стресс у животных?

Конфиденциальность данных — кто имеет доступ к данным о ферме и животных?

Прозрачность алгоритмов — насколько понятны фермерам решения, предлагаемые системами ИИ?

Цифровой разрыв — не приведет ли цифровизация к усилению неравенства между крупными и мелкими производителями?

Как подчеркивается в исследовании, важны «прозрачность и доверие», а также «права на данные» фермеров.

Одной из наиболее серьезных проблем является значительный разрыв между технологическими обещаниями цифровых двойников и эмпирической доказательной базой. Как показано в систематическом обзоре по птицеводству, «ни одно рецензируемое исследование не количественно оценило полный жизненный цикл углеродного следа инфраструктуры цифровых двойников в птицеводстве. Только одно исследование с полевой валидацией сообщает об измеримом улучшении коэффициента конверсии корма, и дизайн этого исследования ограничивает его применимость».

Аналогичные выводы представлены в исследовании по молочному и птицеводческому животноводству: «требуется строгая валидация в коммерческих условиях, интеграция механистического и статистического моделирования, открытые и модульные архитектуры».

Перспективным направлением является разработка гибридных моделей, сочетающих физико-информированное моделирование (основанное на биологических и физических законах) и статистическое моделирование (на основе данных). Такой подход позволяет использовать сильные стороны обоих методов: физические модели обеспечивают интерпретируемость и обобщаемость, а модели данных — точность и адаптивность.

Как отмечается в исследовании, «гибридные подходы, сочетающие физико-информированные и модели на основе данных» являются ключевым направлением развития цифровых двойников.

Федеративное обучение — подход, при котором модели обучаются на распределенных данных без их централизации — представляет собой перспективное решение проблемы конфиденциальности данных. Как отмечается в проекте по сохранению конфиденциальности в молочном животноводстве, «федеративное обучение в сочетании с цифровыми двойниками и большими языковыми моделями» позволяет оптимизировать принятие решений при сохранении конфиденциальности данных.

Критически важным направлением является разработка стандартизированных метрик для оценки эффективности цифровых двойников. Как отмечается в обзоре по птицеводству, «стандартизированная система оценки эффективности, специфичная для птицеводства, не была установлена». Без общих метрик невозможно сравнивать различные системы и определять лучшие практики.

Необходимы исследования по оценке полного жизненного цикла инфраструктуры цифровых двойников, включая углеродный след производства и утилизации оборудования. Как подчеркивается в критических обзорах, «жизненные циклы углеродного воздействия цифровых инфраструктур редко количественно оцениваются, даже когда преимущества устойчивости часто утверждаются».

Дальнейшее развитие цифровых двойников в животноводстве будет определяться их интеграцией с другими технологиями Индустрии 4.0 и Сельского хозяйства 4.0. Как отмечается в исследовании, «будущее PLF выглядит многообещающим с достижениями в области искусственного интеллекта, машинного обучения, блокчейна и дополненной реальности, которые, как ожидается, будут стимулировать дальнейшие инновации и расширять возможности цифровых двойников».

Заключение

Цифровые двойники и единые экосистемы данных представляют собой одно из наиболее перспективных направлений цифровой трансформации животноводства. Они позволяют интегрировать разнородные потоки данных — от сенсоров IoT и систем компьютерного зрения до геномной информации и данных о кормлении — в целостные динамические модели, обеспечивающие принятие решений на основе данных в реальном времени.

Однако анализ современного состояния исследований и практических внедрений выявляет

значительный разрыв между технологическими обещаниями и эмпирической доказательной базой. Как показывают систематические обзоры, на сегодняшний день в коммерческих молочных и птицеводческих системах не развернуты полноценные цифровые двойники инженерного уровня.

Успешная реализация цифровых двойников в животноводстве требует комплексного решения взаимосвязанных проблем:

Технических — масштабируемость, надежность сенсоров, интероперабельность, качество данных.

Экономических — снижение стоимости внедрения и эксплуатации, разработка экономически эффективных решений для фермеров разного масштаба.

Социально-этических — обеспечение благополучия животных, конфиденциальности данных, прозрачности алгоритмов и доверия фермеров.

Методологических — разработка гибридных моделей, стандартизация метрик эффективности и методов валидации.

Перспективными направлениями будущих исследований являются разработка открытых и модульных архитектур, федеративное обучение для сохранения конфиденциальности данных, оценка жизненного цикла цифровых инфраструктур и интеграция цифровых двойников с другими технологиями Индустрии 4.0.

Как справедливо отмечается в исследовании, «прогресс для коров и кур потребует строгой валидации в коммерческих условиях, интеграции механистического и статистического моделирования, открытых и модульных архитектур и структур управления, которые поддерживают биологическую, экономическую и экологическую подотчетность». Только при выполнении этих условий технология цифровых двойников сможет реализовать свой потенциал по трансформации животноводства в более эффективную, устойчивую и этичную отрасль.

Список литературы:

[1] Brown Brandl T.M., Tao J. ASAS NANP Symposium: mathematical modeling in animal nutrition: harnessing real time data and digital twins for precision livestock farming // *Journal of Animal Science*. 2025. Vol. 103. P. skaf138. DOI: 10.1093/jas/skaf138.

[2] Neethirajan S. Digital Twins for Cows and Chickens: From Hype Cycles to Hard Evidence in Precision Livestock Farming // *Agriculture*. 2026. Vol. 16, No. 2. Art. 166. DOI: 10.3390/agriculture16020166.

[3] Neethirajan S.R. Digital Twins in Poultry Farming: Deconstructing the Evidence Gap Between Promise and Performance // *Applied Sciences*. 2026. Vol. 16, No. 3. Art. 1317. DOI: 10.3390/app16031317.

[4] Albayrak A. A multi layered digital twin framework for smart agriculture and livestock: System architecture and implementation challenges // *Information and Software Technology*. 2026. Vol. 175. Art. 107654.

[5] Arulmozhi E., Lee J., Kim D. et al. From Reality to Virtuality: Revolutionizing Livestock Farming Through Digital Twins // *Agriculture*. 2024. Vol. 14, No. 12. Art. 2231. DOI: 10.3390/agriculture14122231.

[6] Abdelrahman M., Wang H., Smith J. et al. From machine learning to digital twin integration for livestock production and research // *Frontiers in Veterinary Science*. 2026. Vol. 13. Art. 1529760. DOI: 10.3389/fvets.2026.1529760.

[7] Youssef A., Vodoretzova K., Aarts Y. et al. IUMENTA: A generic framework for animal digital twins within the Open Digital Twin Platform // *arXiv*. 2024. arXiv:2411.02178. URL: <https://arxiv.org/abs/2411.02178> (дата обращения: 02.07.2026).

[8] Morgan Pereira P.H., de Oliveira R., Ferreira L. Digital twins in agriculture: A systematic literature review on modeling, semantics, and interoperability // *Smart Agricultural Technology*. 2026. Vol. 10. Art. 100345.

[9] Van der Tol P.P.J., de Vries M., van der Werf H. From isolated data to integrated ecosystems: the artificial intelligence revolution in precision livestock farming // *Animal Frontiers*. 2026. Vol. 16, No. 1. P. 5–12.

[10] Kumar S., Gupta P., Singh R. Harnessing digital twins: transforming livestock supply chain management: a comprehensive review // *International Journal of Logistics Research and Applications*. 2026.

References:

[1] Brown Brandl T.M., Tao J. ASAS NANP Symposium: mathematical modeling in animal nutrition: harnessing real time data and digital twins for precision livestock farming // *Journal of Animal Science*. 2025. Vol. 103. P. skaf138. DOI: 10.1093/jas/skaf138.

[2] Neethirajan S. Digital Twins for Cows and Chickens: From Hype Cycles to Hard Evidence in Precision Livestock Farming // *Agriculture*. 2026. Vol. 16, No. 2. Art. 166. DOI: 10.3390/agriculture16020166.

[3] Neethirajan S.R. Digital Twins in Poultry Farming: Deconstructing the Evidence Gap Between Promise and Performance // *Applied Sciences*. 2026. Vol. 16, No. 3. Art. 1317. DOI: 10.3390/app16031317.

[4] Albayrak A. A multi layered digital twin framework for smart agriculture and livestock: System architecture and implementation challenges // *Information and Software Technology*. 2026. Vol.

175. Art. 107654.

[5] Arulmozhi E., Lee J., Kim D. et al. From Reality to Virtuality: Revolutionizing Livestock Farming Through Digital Twins // Agriculture. 2024. Vol. 14, No. 12. Art. 2231. DOI: 10.3390/agriculture14122231.

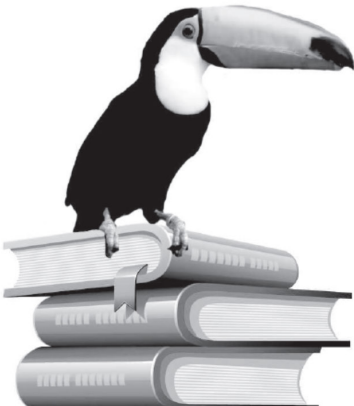
[6] Abdelrahman M., Wang H., Smith J. et al. From machine learning to digital twin integration for livestock production and research // Frontiers in Veterinary Science. 2026. Vol. 13. Art. 1529760. DOI: 10.3389/fvets.2026.1529760.

[7] Youssef A., Vodoretzova K., Aarts Y. et al. IUMENTA: A generic framework for animal digital twins within the Open Digital Twin Platform // arXiv. 2024. arXiv:2411.02178. URL: <https://arxiv.org/abs/2411.02178> (access date: 02.07.2026).

[8] Morgan Pereira P.H., de Oliveira R., Ferreira L. Digital twins in agriculture: A systematic literature review on modeling, semantics, and interoperability // Smart Agricultural Technology. 2026. Vol. 10. Art. 100345.

[9] Van der Tol P.P.J., de Vries M., van der Werf H. From isolated data to integrated ecosystems: the artificial intelligence revolution in precision livestock farming // Animal Frontiers. 2026. Vol. 16, No. 1. P. 5–12.

[10] Kumar S., Gupta P., Singh R. Harnessing digital twins: transforming livestock supply chain management: a comprehensive review // International Journal of Logistics Research and Applications. 2026.



**ЮРИДИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ЮРКОМПАНИ»**

Издание учебников,
учебных и методических
пособий, монографий,
научных статей.

Профессионально.

В максимально
короткие сроки.

Размещаем
в РИНЦ, E-Library.

ЮРКОМПАНИ

www.law-books.ru