

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ: АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ТЕНДЕНЦИЙ

Эшпулатов Достонбек Боходир угли

*Базовый докторант кафедры “Экономика” Гулистанского
государственного университета*

Аннотация. Концепция виртуального представления объектов в реальном времени ставит цифрового двойника в уникальное положение, позволяющее оцифровывать сельское хозяйство. В этом исследовании проводится систематический обзор литературы по цифровым двойникам в сельском хозяйстве, определяющий текущие тенденции и открытые вопросы с целью повышения осведомленности и понимания цифрового двойника и его возможностей.

Ключевые слова: *сельское хозяйство, цифровая экономика, технологии цифровых двойников.*

Annotatsiya: Obyektlarni real vaqtda virtual tasvirlash kontsepsiyasi raqamli egizaklarni qishloq xo'jaligini raqamlashtirishda katta imkoniyatlar ochib beradi. Ushbu tadqiqot ishida raqamli egizaklar va uning imkoniyatlari to'g'risida xabardorlikni oshirish va uni to'liqroq tushunish maqsadida zamonaviy tendentsiyalar va ochiq savollarni belgilovchi adabiyotlarni tizimli ravishda ko'rib chiqiladi.

Kalit so'zlar: *qishloq xo'jaligi, raqamli iqtisodiyot, raqamli egizaklar texnologiyasi.*

Abstract. Because of the notion of real-time virtual representation, the Digital Twin is uniquely positioned to allow farm digitalization. This study provides a Systematic Literature Assessment of Digital Twins in Agriculture, outlining current trends and unanswered issues in order to raise awareness and knowledge of the Digital Twin and its potential.

Keywords: *agriculture, digital economy, Digital Twin technology.*

Введение

Истоки сельского хозяйства можно проследить до ранней истории человеческой цивилизации, что остается одной из самых важных отраслей в мире даже сегодня. Объявление 4-й сельскохозяйственной революции или «Сельское хозяйство 4.0» в академических кругах и промышленности обещает цифровизацию, технологический прогресс и повышение эффективности. В то время как Индустрия 4.0 стимулировала значительный прогресс и продвигается

к оцифровке производства, медицины и логистики. Преимущества этой последней революции еще предстоит полностью реализовать в сельском хозяйстве, однако оцифровка становится заметной по мере того, как заинтересованные стороны используют новые возможности, технологии и концепции, такие как интеллектуальное земледелие, точное животноводство и недавно появившийся цифровой двойник. Систематический обзор литературы (СОЛ), проводится, с целью которого является определение уровня развития исследования цифровых двойников в сельском хозяйстве. Основным вкладом этой работы заключается в том, чтобы предоставить заинтересованным сторонам в сельском хозяйстве всесторонний обзор цифровых двойников в сельском хозяйстве, т. е. современные определения, варианты использования, технологии и открытые вопросы.

Цифровой двойник, синхронизированное в реальном времени виртуальное представление продукта, процесса или среды [6,7]. Он предоставляет новые средства для достижения оцифровки посредством высокоточного моделирования и симуляции. Производство, умные города, здравоохранение и сельское хозяйство — это лишь несколько областей, в которых реализуются преимущества внедрения цифрового двойника, хотя и на разном уровне прогресса. Мэтью Смит [11], стремясь спрогнозировать будущие технологии, определил, что внедрение искусственного интеллекта (ИИ) в сельском хозяйстве в конечном итоге приведет к естественному внедрению технологий, подобных цифровым двойникам. Неуклонный рост исследований по таким темам, как киберфизические системы (CPS), Интернет вещей и ИИ, в сочетании с растущим объемом работы над цифровым двойником, придает вес рассуждениям Смита [6].

«Цифровой двойник» (DT) аккредитован Майклом Гривом и его работой с Джоном Викарсом [6,7,12]. Основные концепции, которые позже послужат цифровым двойником, можно найти в докладе об управлении жизненным циклом продукта, представленном в 2002 году [6,7], описываемый как виртуальный, цифровой эквивалент (представление) физического продукта и двунаправленный поток данных между ними. В таблице 1 представлен обзор терминологии, используемой для описания базовых концепций, составляющих цифровой двойника. Цифровой двойник не является строго новой концепцией, как в промышленности, так и в исследованиях уже давно ведется работа над более комплексными методами управления жизненным циклом продукта (ЖЦП), однако цифровой двойник предоставляет уникальный способ достижения этой цели [7,13].

Таблица 1

Моделирование терминологии цифрового двойника [6]

Цифровой двойник – моделирование терминологии	
ФИЗИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ	Физическую объект можно рассматривать как сущность “реального мира”, ее существование не зависит от цифрового двойника. Термин “Физический двойник” может быть использован, когда цифровой двойник действительно существует [6].
ВИРТУАЛЬНЫЙ ОБЪЕКТ	Общая модель (например, <i>untwinned</i>) или аналогичное виртуальное представление продукта, процесса или среды, специфичное для конкретной предметной области.
“Виртуальный двойник” следует использовать, когда виртуальный объект является двойником физической сущности [6]	

Обзор литературы

С момента своего создания и ранней классификации цифровой двойник (ЦД) эволюционировал с точки зрения требований, возможностей и приложений, выходя за рамки своей первоначальной ориентации на производство [6,7]. Кроме того, определение было расширено в попытке приспособить и отразить его новообретенные роли. Терминология цифрового двойника стала все более специфичной для предметной области, адаптируясь к контексту, в котором он работает [6,7]. Исследователи попытались создать общее надежное определение цифрового двойника, которое остается актуальным даже в контексте новых возникающих ролей, непредвиденных применений и достижений в области технологий [6,10,14–17]. Одно из таких определений, приведенное в Энциклопедии производственной инженерии CIRP, гласит: Цифровой двойник - это представление активного уникального “продукта”, который может быть реальным устройством, объектом, машиной, услугой, нематериальным активом или системой, состоящей из продукта и связанных с ним услуг [14]. Рассматривая самые современные разработки и приложения цифрового двойника, Дэвид Джонс и др. [6] в своем систематическом обзоре обнаружили, что текущие тенденции, хотя и с небольшими отклонениями, тесно согласуются с определением, предоставленным CIRP [6,14]. Хотя это расширяющееся определение имеет много преимуществ, предметом растущей озабоченности является неспособность точно отличить цифровых двойников от нецифровых, например, неправильная маркировка ”Общих компьютерных моделей” как цифровых двойников [6,17]. Еще одним моментом двусмысленности является степень точности, которая должна быть достигнута цифровым двойником, чтобы считаться “точным” представлением моделируемого объекта [17].

Критцингер и др. [15] в качестве особенно полезной метрики для ограничения широкого охвата предлагаемого определения выделяют надежный критерий классификации, основанный на уровне интеграции данных, который может быть достигнут между физическим продуктом и его виртуальным представлением. Поскольку это определение было разработано в области производства, оно обеспечивает косвенный показатель для оценки зрелости, совпадений и расхождений цифровых двойников в сельском хозяйстве по сравнению с современными определениями. В области цифровых двойников можно выделить три таких уровня интеграции (рис. 1).

Цифровая модель (DM), цифровая тень (DS) и, наконец, Цифровой двойник (DT). Однако, чтобы избежать путаницы, поскольку большинство статей в области сельского хозяйства не проводят различий между тремя вышеупомянутыми типами цифровых двойников, уровни интеграции будут переименованы в "subsec:NI", "subsec:PI" и "subsec:FI", см. таблицу 2 [15]. Комбинация определения CIRP [14] и метода категоризации Kritzinger. [15] обеспечивает основу критериев включения и классификации.



Рисунок 1. Цифровой двойник: интеграция данных [7,15]

Комбинация определения CIRP [14] и метода категоризации Kritzinger. [15] обеспечивает основу критериев включения и классификации.

Таблица 2

Цифровой двойник, определяемый его уровнем интеграции данных [15]

Цифровые двойники - уровни интеграции данных	
Модель (Цифровая модель)	Цифровое представление без автоматического обмена данными между объектом и виртуальной моделью. Это самый низкий уровень интеграции, который может быть достигнут. Это можно сравнить с прототипом цифрового близнеца [7,10,15]. (Рис. 1: слева)
Частично интегрированный (Цифровая тень)	Цифровое представление с автоматизированным потоком информации в одном направлении. Эта информация передается для объекта в виртуальное представление, что означает, что изменение в объекте отражается в

	виртуальном представлении. Это сравнимо с экземпляром цифрового двойника [7,15]. (Рис. 1: Середина)
Полностью интегрированный (цифровой двойник)	Цифровое представление с автоматизированным двунаправленным потоком информации. Цифровой двойник, подобно цифровой тени, имеет виртуальное представление, отражающее любые изменения в состоянии физического объекта. Отличительный фактор, являющийся цифровым двойником, также может влиять на состояние физического объекта, однако средства зависят от контекста и типа объекта [7,15]. (Рис. 1: справа)

Методология

Систематический обзор литературы направлен на выявление новейших исследований по цифровым двойникам в сельском хозяйстве, выявление оригинальных работ, примеров использования и открытых вопросов. Это сделано для того, чтобы приспособить и продвинуть будущую работу в области цифровых двойников в сельском хозяйстве.

Чтобы определить релевантное исследование, авторы обратились к онлайн-базам данных литературы (таблица 3), консультируясь с оригинальными работами для определения поисковых запросов.

Таблица 3

База данных литературы

	База данных	Первоначальный отбор
1.	Google Scholar	1750
2.	IEEE-Explore	8
3.	Springer Link	87
4.	Scopus	23
5.	ScienceDirect	154
6.	ACM Digital Library	4
7.	Web of Science	15

Затем обзор был проведен с использованием поисковых строк, построенных на основе информации, выявленной в ходе первоначального поиска литературы, с использованием следующей поисковой строки:” Цифровой двойник” и” Сельское хозяйство”. Извлеченная литература включала журнальные статьи, исследовательские отчеты, исследовательские статьи, разделы книг, энциклопедию.

Как только материалы были собраны и дубликаты удалены, материалы были отфильтрованы, чтобы исключить те, которые не имели прямого отношения к цифровому двойнику в сельском хозяйстве. Применимые работы были определены на основе следующих характеристик:

1. Журнальные статьи, исследовательские отчеты, исследовательские статьи, публикации на конференциях или научная энциклопедия.
2. Статьи на английском языке.

3. Основное внимание в статье уделяется применению цифрового двойника в сельском хозяйстве.

В подавляющем большинстве извлеченных материалов сельское хозяйство упоминалось мимоходом или в качестве примера использования концепций цифрового двойника. Как таковые, они исключены из окончательного набора материалов.

Затем эти документы были рассмотрены с целью получения ответов на следующие исследовательские вопросы:

Что такое цифровой двойник и как его можно классифицировать?

Каково текущее применение цифровых двойников в сельском хозяйстве?

Что такое цифровой двойник на концептуальном и технологическом уровне?

Каковы открытые вопросы и потребности в будущих исследованиях?

Результаты

Результатом систематического обзора литературы стал окончательный сборник из 31 статьи, как показано в таблице 4. Каждый элемент сборника помещен в одну из четырех категорий, указанных в таблице 2 [7,14,15]. Большинство выявленной литературы не было классифицировано как “подраздел:FI”, см. рис. 2 [15].

Таблица 4

Литература по цифровым двойникам в сельском хозяйстве

* Полностью, ** Приблизительно

Исследования	Содержание	Интеграция	Применение
VERDOUW-2017 [27]	Обзор	-	Инкубаторы
PYLIANIDIS-2021 [5]	Обзор	-	Сельское хозяйство
VERDOUW-2021 [4]	Обзор	-	Умное сельское хозяйство
NEETHIRAJAN2021 [28]	Обзор	-	Животноводство
LARYUKHIN-2019 [22]	Описание модели	Модель	Управление фермой
TAGLIAVINI-2019 [29]	Описание модели	Модель	Качество фруктов
ALVES-2019 [18]	Описание проекта	Частично	Полевое орошение
JAYARAMAN2016 [21]	Описание платформы	Частично	Сбор урожая
NISWAR-2018 [20]	Описание проекта	Частично	Разведение крабов
ERDELYI-2019 [23]	Описание проекта	Частично	Животноводство
LOKE-2018 [19]	Тематическое исследование	Частично	Мониторинг удобрений
SKOBELEV-2020 [30]	Описание проекта	Частично	Выращивание пшеницы

JOHANNSEN2020 [31]	Описание проекта	Частично	Городское пчеловодство
JANS-SINGH2020 [32]	Описание проекта	Частично	Городское фермерство
ANGIN-2020 [33]	Описание проекта	Частично	Выращивание сельскохозяйственных культур
GHANDAR-2021 [34]	Описание проекта	Частично	Аквапоника
DELGADO-2019 [35]	Описание платформы	Частично	Управление фермой
TSOLAKIS-2019 [36]	Описание платформы	Частично	Беспилотные наземные транспортные средства
MACHL-2019 [37]	Описание модели	Частично	Культивируемый ландшафт
PARAFOROS2019 [38]	Описание платформы	Частично**	Сельскохозяйственная техника
MOGHADAM2020 [39]	Описание проекта	Частично**	Производство фруктов
HOWARD-2020 [40]	Описание проекта	Полностью**	Теплицы
JO-2018 [41]	Описание проекта	Полностью	Животноводство
JO-2019 [42]	Описание проекта	Полностью	Животноводство
KAMPKER-2019 [43]	Разработка бизнес-модели	Полностью	Сбор урожая картофеля
KEATES-2019 [44]	Описание проекта	Полностью	Домашний скот/Мясо цепочка поставок
MONTEIRO-2018 [45]	Модель реализации	Полностью	Вертикальное земледелие
SMITH-2018 [11]	Прогноз	Полностью	Общее сельское хозяйство (животноводство, растениеводство)
SUSAREV-2019 [46]	Описание проекта	Полностью	Сельскохозяйственное транспортное средство
AHMED-2019 [47]	Описание проекта	Полностью	Аквапоника
DOLCI-2017 [48]	Описание проекта	Полностью	Производство солода

Основной причиной этого была неспособность продемонстрировать, соответствовать или выполнить требования, изложенные в используемых определениях, см. таблицу 2. Эти отпущения могут быть частично объяснены ранним и развивающимся состоянием исследований по данной теме [5,18–23]. Эти выводы согласуются с наблюдениями, сделанными Пилианидисом и др., о том, что большинство документированных применений в сельском хозяйстве все еще находятся на концептуальном уровне [5]. Поскольку большинство цифровых двойников в сельском хозяйстве можно рассматривать как находящиеся в процессе разработки и как таковые не развертываются за пределами экспериментального масштаба или лабораторных условий. Основной причиной, которая была приписана этому отставанию в развитии, является трудность и сложность моделирования живых существ, причем даже неживые

существа взаимодействуют, воздействуют или подвергаются воздействию живых существ [5].

В этом отношении методы моделирования, основанные на данных, такие как машинное и глубокое обучение, демонстрируют уникальную способность улавливать и моделировать высоко динамичные и сложные характеристики этих больших многомерных и многокомпонентных систем (т.е. систем, содержащих множество взаимосвязанных живых и неживых объектов) [13,24]. Здесь использование систем, подключенных к Интернету Вещей, является ключевым фактором, позволяющим собирать прямые и косвенные измерения (т.е. данные), необходимые для моделирования наблюдаемой системы, с целью захвата основных характеристик охватываемых объектов, условий окружающей среды и влияющих взаимодействий объекта и внешней среды [25]. Однако эти методы не лишены недостатков, связанных с изменением условий данных и концепций, а также опасений по поводу надежности этих методов. Особенно в приложениях для обеспечения безопасности и принятия решений, где аномальные условия могут оказать неблагоприятное воздействие на процесс принятия решений в таких моделях.

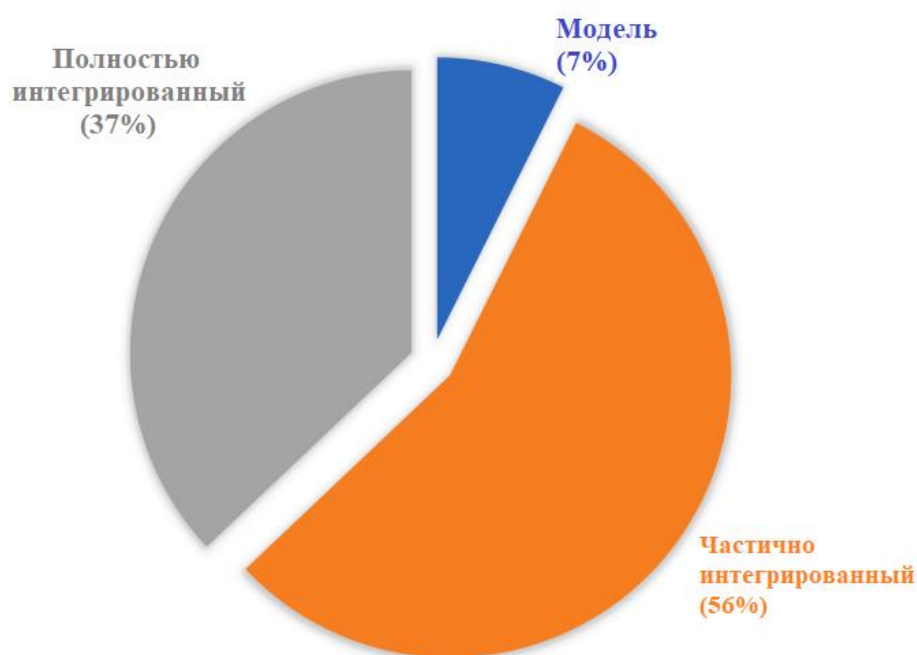


Рисунок 2. Разбивка материалов по уровню интеграции данных [7,15].

Для того чтобы такие методы завоевали широкое доверие и были приняты в сельском хозяйстве, необходимо изучить и преодолеть существующие проблемы. Гибридное моделирование является одним из таких подходов, который мог бы свести на нет многие текущие недостатки, с которыми сталкиваются системы, управляемые данными, путем ограничения логики принятия решений, основанной на экспертных знаниях, для обеспечения

надежного и поддающегося повторному воспроизведению операционного действия [26]. Хотя гибридное моделирование представляет собой интригующий путь для будущего применения, исследования по этой теме остаются ограниченными, с редкими примерами технологий, доступных в сельском хозяйстве. Таким образом, эта работа выделяет подходы к моделированию на основе данных и гибриднему моделированию в качестве областей исследований для будущих исследований, как с точки зрения новых приложений, так и с точки зрения изучения недостатков и стратегий их устранения. Ниже приводится разбивка литературы, определенной СОЛ, по уровню интеграции.

Модель

Как самая маленькая группа, состоящая всего из 2 статей, отсутствие примеров на уровне интеграции модели можно рассматривать как положительный момент; приложения попадают на более высокие уровни интеграции, а также существует и отрицательный момент; основной причиной этого является ограниченность исследований по теме. Тальявини и др. [29] и Ларюхин и др. [22] предлагают новые подходы к моделированию в контексте Digital Twinning с использованием методов мультифизического и мультиагентного моделирования соответственно. Хотя эти решения вносят ценный вклад в моделирование объектов и их взаимодействий в сельском хозяйстве, инфраструктура и методы автоматизированного сбора данных являются ключевыми для обеспечения возможности и адекватного отражения состояния объектов в режиме реального времени. Поскольку цифровые двойники и оцифровка все еще находятся на ранней стадии, моделирование таких сельскохозяйственных систем может оказаться сложной задачей, и в случае цифрового двойничества это обязательное условие, которое необходимо учитывать при рассмотрении цифровых двойников в сельском хозяйстве, в этом контексте разработка модели может быть понята как неотъемлемый шаг на пути к цифровому двойнику.

Частично интегрированный

Частично интегрированные цифровые двойники составляют самую большую группу из 15 статей. Рассмотренные работы подчеркивают трудность достижения полной интеграции. Однако этот этап разработки позволяет получить представление о процессе создания цифровых двойников применительно к новым приложениям. Позволяя заинтересованным сторонам получить более глубокое понимание объектов, можно исследовать и оценить подходы к полной интеграции [21]. Это может быть обеспечено с помощью сопоставления данных, обеспечивающего понимание лежащих в основе взаимодействий и поведения объектов. Второй метод мог бы заключаться в

использовании частично интегрированного цифрового двойника в качестве основы для исследования и тестирования новых технологий и моделей, способствуя постепенному развитию цифрового двойника [18-20].

Хотя точная степень автоматизации или требуемый уровень прямого взаимодействия с реальным объектом все еще несколько неоднозначны. Способность воздействовать на объекты реального мира является основным требованием, изложенным в определении интеграции, что требует проведения различия между полностью и частично интегрированными цифровыми двойниками, что часто упускается из виду в обзорной литературе [19, 23, 30].

Полностью интегрированный

Обзор выявил 10 работ, в которых задокументированы полностью интегрированные цифровые двойники, достигающие требуемых характеристик данных в реальном времени, достаточно смоделированное поведение объектов и механизмы обратной связи [40, 41, 45]. Эти цифровые двойники охватывают широкий спектр применений, включая оптимизацию энергопотребления в свинарниках, картофелеуборочных комбайнах и производственно-сбытовых цепочках животноводства [42-44]. Однако ограниченное количество статей дает представление о последнем и необычайном состоянии этой области.

Литература без категоризации

Хотя в ходе обзора было выявлено множество полезных применений цифрового двойника в сельском хозяйстве, в общей сложности четыре публикации не соответствовали критериям интеграции, изложенным в таблице 2. Публикации без четкого применения (например, обзоры, обсуждения концепций и исследования предметной области) были отмечены как неприменимые (т.е. "-") к комплексной оценке и обобщению результатов этой работы. Однако, как общий источник информации, эти публикации оказались ценным ресурсом для контекстуализации основополагающих концепций цифрового двойника и его развития в сельском хозяйстве, предоставляя важную информацию и обсуждение текущих и будущих направлений исследований цифрового двойника в сельском хозяйстве. Поэтому, благодаря их ценному вкладу, эти публикации были включены в итоговый корпус систематический обзор литературы.

Приложения и варианты использования

В этом разделе рассматривается оценка основного направления опубликованных исследований в попытке определить области применения и тенденции цифровых двойников в сельском хозяйстве. Эти процессы выявили широкий спектр применений, причем сельскохозяйственные культуры оказались

самой большой областью применения с 9 работами, полную разбивку можно посмотреть в таблице 5.

Таблица 5

Тематическая кластеризация литературы

Тематическая применимая область	Номер
Урожай	9
Сельское хозяйство в городских условиях и контролируемой окружающей среде	6
Животноводство	4
Дизайн продукта	4
Цепочки поставок и создания стоимости	3
Политика; окружающая среда и инфраструктура	1

Следует отметить; Вердоу и Круз [27] провели обзор стартапов, участвующих в проектах SmartAgriFood и Fractals. Демонстрируя способность цифровых двойников добиваться коммерческого успеха и то, что концепция не ограничивается исключительно исследовательскими приложениями, в общей сложности было выявлено шесть компаний, которые используют цифрового двойника в том или ином качестве [27]. Однако, поскольку эти проекты акселератора не ориентированы исключительно на исследования, информация несколько ограничена (например, конкретные реализации цифровых двойников). Отсутствие подробной информации чрезвычайно затрудняет определение уровня интеграции данных каждого проекта. Чтобы избежать двусмысленности или неправильных результатов и лучше соответствовать целям этой работы, эти проекты будут исключены из обзора. В приведенном ниже итоговом обзоре каждая статья классифицирована в рамках своего тематического кластера.

1. Сельскохозяйственные культуры; Мониторинг, оптимизация ресурсов и поддержка выращивания.

Артюхин и др. [22] стремясь преодолеть сложность сельскохозяйственных систем, они предлагают киберфизический мультиагентный подход. Эти (агентные) объекты представляют собой критически важные элементы управления (например, почву, удобрения, урожай, фермера и т.д.) и взаимодействуют друг с другом на основе конечных действий и наборов правил в рамках виртуального рынка [22]. Помогает оптимизировать использование ресурсов и затраты на развертывание с целью поощрения развития эмерджентного поведения, создавая более точную модель процессов и взаимодействий, чем это было бы практично в противном случае. Ключевым моментом, изложенным Ларюхиным и др. [22], является разработка цифрового

двойника урожая путем мониторинга роста и прогнозирования результатов с помощью моделирования.

2. Животноводство; Мониторинг, управление и оптимизация.

Эрдели и др. [23] исследуют цифрового двойника для производителей свинины на откорме, их предварительные результаты выявили проблемы, связанные с моделированием систем с неопределенными факторами, например, с участием человека. В качестве начального шага рассматриваются только отдельные подсистемы и точки их взаимодействия, моделируя каждую с помощью математических уравнений, которые отражают взаимосвязи и характеристики производственного процесса [23]. Используется комбинация производственных данных и измерений на животных для моделирования с целью оптимизации производственного процесса.

3. Городская, контролируемая окружающая среда и аквапоническое земледелие.

Монтейро и др.[45] обсуждают разработку цифрового двойника для вертикального земледелия, уделяя особое внимание созданию устойчивой и адаптируемой автоматизации для структур вертикального земледелия. Предлагается включить методы проектирования резервирования, позволяющие идентифицировать аппаратные сбои и гарантирующие, что системы выходят из строя безопасным образом. Для достижения этого используется сочетание тесной интеграции между физическими и виртуальными объектами на стадии проектирования, оптимизации системы и методов упреждающего снижения потенциальных рисков. Основной целью является создание оптимальной физической среды для цифрового двойника. Это делается в попытке избежать нежелательного поведения в случае сбоя системы, неверных показаний датчиков или внешних факторов [45]. Построение цифрового двойника с помощью этих методов может уменьшить операционные помехи, с которыми часто сталкиваются в высокодинамичных средах (например, на ферме), в результате чего поддерживать оптимальные условия чрезвычайно сложно [45].

Выводы

Подводя итог, можно сказать, что цифровой двойник - это мощная концепция, у которой многообещающее будущее в сельском хозяйстве, а текущая работа охватывает целый ряд вариантов использования, включая выращивание сельскохозяйственных культур, робототехнику и аквапонику, которые реализуются с помощью технологий, включая Интернет вещей, машинное обучение и киберфизические системы [11]. Однако необходимо будет рассмотреть открытые вопросы и ответить на них, если мы хотим, чтобы

цифровой двойник был широко успешным при внедрении во всех вариантах использования в сельском хозяйстве [6].

Объем исследований по сельскохозяйственным цифровым двойникам остается ограниченным, при этом основное внимание уделяется исследованию и демонстрации осуществимости приложений и вариантов использования. Обзор литературы определил ключевые области для будущих исследований, такие как имитационное моделирование, моделирование биологических систем и разработка бизнес-моделей, которые необходимы для обеспечения роста и внедрения цифрового двойника в сельском хозяйстве. Разработка новых методов, определений, специфичных для сельского хозяйства, и внедрение стимулирующих технологий будут необходимы для преодоления текущих ограничений и проблем [3,4]. Цифровой двойник предоставляет захватывающую возможность для обеспечения моделирования и автоматизации динамических систем, а также предоставляет захватывающую возможность добиться подлинной оцифровки в такой сложной области, как сельское хозяйство.

Список использованной литературы

1. Z. Zhai, J.F. Martínez, V. Beltran, N.L. Martínez, Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges 170 (2020-03) 105256, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>.
2. M. Ayaz, M. Ammad-Uddin, Z. Sharif, A. Mansour, E.-H.M. Aggoune, Internet-ofthings (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk 7 (2019) 129551–129583, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932609>.
3. R. García, J. Aguilar, M. Toro, A. Pinto, P. Rodríguez, A systematic literature review on the use of machine learning in precision livestock farming 179 (2020-12) 105826, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105826>.
4. C. Verdouw, B. Tekinerdogan, A. Beulens, S. Wolfert, Digital twins in smart farming 189 (2021-04) 103046, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103046>.
5. C. Pylaniadis, S. Osinga, I.N. Athanasiadis, Introducing digital twins to agriculture 184 (2021-05-01) 105942, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105942>.
6. D. Jones, C. Snider, A. Nassehi, J. Yon, B. Hicks, Characterising the digital twin: A systematic literature review 29 (2020-05) 36–52, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>.
7. M. Grieves, Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication (2015-03-01).
8. L. Wright, S. Davidson, How to tell the difference between a model and a digital twin 7 (1) (2020-12) 13, <https://doi.org/10.1186/s40323-020-00147-4>.

9. K. Panetta, Gartner top 10 strategic technology trends for 2019.. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019/>.
10. A. Rasheed, O. San, T. Kvamsdal, Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective 8 (2020) 21980–22012, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>.
11. M.J. Smith, Getting value from artificial intelligence in agriculture, over the next 10+ years, 2018. [10.31220/osf.io/q79mx](https://doi.org/10.31220/osf.io/q79mx).
12. M. Grieves, J. Vickers, Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems, in: F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Springer International Publishing, 2017, pp. 85–113, https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4.