



Андрей ПИЛИПУК

*Институт системных исследований в АПК НАН Беларуси,
Минск, Республика Беларусь
e-mail: pilipuk@list.ru*

УДК 004:631.1
<https://doi.org/10.29235/1818-9806-2023-10-3-21>

Концепция развития цифровых двойников в сельскохозяйственном производстве: аспекты теории и практики

Представлена авторская концепция развития и системного применения технологии цифровых двойников для повышения эффективности производства в стоимостной цепи АПК. Проанализирована практика использования цифровых двойников в сельском хозяйстве. Выделены основные преимущества, недостатки, принципы, а также инфраструктура для их построения. Обоснованы экономические эффекты и актуальность применения цифровых двойников для моделирования производственно-экономических процессов на уровне предприятия, района, отрасли с выходом на формирование Платформы цифровых двойников сельскохозяйственного производства.

Ключевые слова: цифровой двойник, сельскохозяйственное производство, предприятие, сельское хозяйство, цифровизация аграрной сферы, моделирование в АПК, машинное обучение.

Andrei PILIPUK

*Institute of System Researches in the Agroindustrial Complex
of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus
e-mail: pilipuk@list.ru*

The concept of the development of digital twins in agricultural production: aspects of theory and practice

The article presents the author's concept of development and systemic application of digital twins technology to improve production efficiency in the value chain of agroindustrial complex. The analysis of the practice of using digital twins in agriculture has been carried out. The main advantages, disadvantages, principles, as well as the infrastructure for their construction are highlighted. The economic effects and the relevance of the use

© Пилипук А., 2023

of digital twins for modeling production and economic processes at the level of an enterprise, district, industry with opening onto the formation of the digital twins platform for agricultural production are substantiated.

Keywords: digital twin, agricultural production, enterprise, agriculture, digitalization of the agricultural sector, modeling in agroindustrial complex, machine learning.

Введение

Актуальность развития методологии и инструментария создания, мониторинга и совершенствования технологий цифровых двойников (ЦД) выделена нами в условиях широкого и последовательного внедрения механизмов обработки больших данных и интернета вещей. Их активное освоение и использование позволяет не только отслеживать (при помощи датчиков, камер, дистанционного зондирования и др.) актуальное (практически в реальном времени) состояние физических объектов с высоким пространственным разрешением, но и успешно прогнозировать (на основе выявления и постоянного совершенствования алгоритмов оценки влияния факторов среды) их будущие состояния на всех стадиях жизненного цикла. Указанное в полной мере отражает суть и содержание концепции ЦД.

Совершенно точно можно утверждать, что к настоящему времени развитие информатизации критически важно для широкого использования эффективных моделей и инструментов поддержки принятия решений, обеспечивающих рост производительности АПК. Например, ряд базовых для ЦД технологий интенсивно внедряются в практику в качестве прикладных решений. Их развитие при снижении стоимости хранения, обработки и передачи данных сформировало условия активной интеграции информационных (например, искусственный интеллект (AI), машинное обучение (ML), аналитика больших данных (Big Data) и интернет вещей (IoT)) и аграрных технологий при создании и внедрении цифровых двойников в сельском хозяйстве (далее – ЦД СХ). При этом современные оценки показывают, что в 2020 г. мировой рынок ЦД составил 3,1 млрд долл. США, прогноз на 2023 г. – 5 млрд, потенциал роста к 2033 г. – 95 млрд [1–3].

Выполненный нами анализ подтверждает, что технологии ЦД активно внедряются в крупнейших мировых транснациональных компаниях, например Siemens, General Electric, US Airforce, Oracle, ANSYS, SAP и Altair. Развитие получили также специализированные приложения для разработки ЦД, такие как Predix и Simcenter 3d [4].

Исследования доказывают, ученые-аграрии Беларуси также накопили достаточный объем ноу-хау, позволяющих целенаправленно формировать серию ЦД в технологической цепи производства продукции АПК. В практическом плане создана основа для моделирования агропромышленного производства на различных уровнях (продукт, технология, процесс, предприятие, регион, отрасль, страна) [5]. При этом интенсивное формирование и внедрение ЦД в практику:

требует организации широких групп разработчиков: экспертов в предметных областях АПК (агрономия, экономика, ветеринария и др.), специалистов по датчикам и IoT, машинному обучению, искусственному интеллекту и многих других;

предполагает поиск инструментов снижения общих затрат на разработку и развертывание ЦД с целью рентабельного внедрения и эксплуатации с возможностью масштабирования.

Вместе с тем анализ публикаций [4–6], отражающих практику внедрения ЦД, показывает, что в настоящий момент сама технология проходит активную стадию становления. Эффективная адаптации при оцифровке реальных физических объектов сельскохозяйственного производства предполагает выделение конкретных экономических преимуществ. При этом следует отметить, что, например, двойники цепочек поставок активно развиваются во многих отраслях, в том числе в сфере производства продовольствия, что отражает высокую актуальность совершенствования систем прослеживаемости и сокращения отходов.

В англоязычных публикациях термин «цифровой двойник – digital twin» в научно-практических изданиях впервые представил М. Гривз в 2011 г. [7, p. 133] для описания текущих проектов NASA по управлению жизненным циклом продуктов (Product Lifecycle Management, PLM) [4, 8]. При этом концепция PLM, презентованная в 2002 г., уже включала основные элементы ЦД: физическое и виртуальное пространства (в том числе виртуальные подпространства), а также существующие между ними потоки связанных данных [9]. Важно также отметить, что идея ЦД была представлена М. Гривзом значительно ранее 2011 г., а именно в лекции по управлению жизненным циклом продукта в 2003 г. [6, 9]. На современном этапе У. Перселл, Т. Нойбауэр, Д. Джонс, К. Снайдер, А. Нассе-хи, Д. Йон, Б. Хикс представили следующее актуальное определение ЦД – это «синхронизированное в реальном времени виртуальное представление продукта, процесса или среды» [5, 6].

В издании CIRP Encyclopedia of Production Engineering за 2019 г. (выпущенном под эгидой The International Academy for Production Engineering) «цифровой двойник – это цифровое представление активного уникального продукта (реального устройства, объекта, машины, услуги или нематериального актива) или уникальной системы продукт-услуга (система, состоящая из продукта и связанной с ним услуги), которое содержит его выбранные характеристики, свойства, условия и поведение, с помощью моделей, информации и данных в рамках одной или даже нескольких фаз жизненного цикла» [10].

В СТБ Республики Беларусь 2583-2020 «Цифровая трансформация. Термины и определения» цифровой двойник – это «виртуальная цифровая модель (прототип) существующего в реальности физического объекта или процесса, моделирующая внутренние процессы, технические характеристики и поведение реального объекта в условиях взаимодействия помех и окружающей среды» [11; 12, с. 258].

Применительно к сельскому хозяйству работы о ЦД представлены с 2017 г. [4]. Вместе с тем технологии ЦД СХ до настоящего времени не получили широкого распространения. Большинство их описаны на концептуальном уровне, где обоснованность и доказуемость конкретных эффектов применения и внедрения представлены недостаточно [4, 5].

Основная часть

Выполненные нами исследования показывают наличие значительных отличий и особенностей технологии ЦД от известных и используемых прогнозных моделей (например, в рамках экономико-математического моделирования, ERP-систем). Это формирует значительные риски развития концепции виртуальных двойников в реальной практике сельскохозяйственного производства. В данной связи нами выделены три отличительных параметра, которые важно учитывать в научно-практической части применения технологии:

во-первых, неизбежность моделирования процессов жизнедеятельности организмов (прямо или косвенно). Это определяет высокую сложность интеграции ЦД СХ с их физическими оригиналами (в части обратной связи, оценки и «перерасчета») алгоритмов ЦД). Вместе с тем исследования показывают, что именно технология ЦД в наибольшей степени подходит для описания сложных систем аграрного производства с высоким уровнем неопределенности;

во-вторых, значительная протяженность пространственного измерения моделируемых физических объектов в АПК. ЦД СХ варьируются от микроорганизмов, растений, животных и их множества сочетаний до двойников товаров (продуктов), техники и технологии, земельных участков, ферм, регионов, отраслевых подкомплексов, всего АПК и даже модели продовольственной безопасности страны, региона и мира в целом. Таким образом, имеет место задача изучения эффектов в значительно отличающихся масштабах;

в-третьих, различная продолжительность временных интервалов развития живых физических объектов (растения и животные, для которых моделируются ЦД СХ). В ряде случаев это определяет задержку фактических (видимых, наблюдаемых) реакций биологических систем на внешние воздействия. Сельскохозяйственные процессы, как правило, развиваются относительно медленно. В данной связи снижается значимость и качество высокочастотных взаимодействий между реальными и цифровыми двойниками.

Преимущества ЦД

Выполненные нами исследования доказывают, что отсутствие широкого внедрения ЦД СХ обусловлено слабой проработкой теории и методологии, во-первых, оценки создаваемой ими добавленной стоимости (критерии, показатели, горизонт планирования, методики и др.), а во-вторых, анализа преимуществ (характеристики, отличающие их от существующих технологий с учетом

особенностей внедрения и эксплуатации) и экономических выгод ЦД СХ, позволяющих достоверно рассчитывать эффективность и потенциал их использования. В данной связи нами обобщены и представлены следующие их важные преимущества [4–6]:

учет временного вектора. Позволяет, во-первых, моделировать финансовые потоки и эффективность на протяжении всего горизонта планирования хозяйственной деятельности; во-вторых, оперативно и динамично перестраивать прогнозные состояния имитационной модели-двойника в виртуальной среде в реальном времени по факту поступления отличающихся от «стартовой» модели фактических данных (ЦД динамически воспроизводит реальную систему в виртуальной среде в любой точке временного интервала ее жизненного цикла для оптимизации и оперативного принятия решений);

устранение ограничений, касающихся места и времени наблюдения человеком. ЦД обеспечивают удаленное и автоматическое выполнение, мониторинг, контроль и координацию операций;

автоматизированное повышение точности прогнозных моделей ЦД на основе машинного обучения и использования реальных (фактических) данных мониторинга воздействий и состояний физического объекта;

визуализация данных, применяемых технологий, форм представления. Повышает их понимание и доступность для широкого круга заинтересованных сторон;

разграничение прав доступа. Минимизирует пользовательские ошибки за счет исключения несанкционированных вмешательств во внутренние алгоритмы ЦД с ориентацией на стандартные видимые (наблюдаемые) проявления состояний реальных аналогов;

персонализированное управление. Позволяет выявлять и включать в ЦД СХ локальные особенности, адаптировать их для каждого физического объекта, накапливать данные и «обучать» прогнозную модель с учетом индивидуальных (локальных, местных) характеристик, отражающих продуктивность, экономичность, эффективность, конкурентоспособность и другие показатели;

оптимизация производственных процессов. Автоматизированный сбор данных о состоянии физических объектов позволяет моделировать процессы с учетом наличных и потенциальных ресурсов. Сокращаются затраты физического времени управленческого и технического персонала, снижается влияние «человеческого фактора» при интерпретации отчетов и принятии решений;

слияние информации. Позволяет интегрированно анализировать и учитывать операции, которые ранее оценивались отдельно (например, информация из нескольких разнородных источников) с помощью индивидуальных инструментов и решений мониторинга. Это значительно снижает сложность анализа, экономит время и устраняет барьеры переключения между системами и моделями. В данной связи справедливо утверждать, что модель ЦД наблюдает и сравнивает

множество показателей физического объекта, поступающих из различных несвязанных источников данных;

широкие возможности моделирования рисков, отвечающих на вопросы формата «что, если?». Это позволяет изучать возможные будущие состояния и сопоставлять их с целевыми прогнозами. Объединение информации в сочетании с непрерывным характером ЦД СХ отображает полную картину прошлого и текущего состояния системы для оценки ее будущих отклонений;

перекрестное взаимодействие и взаимовлияние цифрового и физического двойников. Так, подключение физического к виртуальному, как и виртуального к физическому, позволяет проектировать системы (модели), которые могут самостоятельно выдвигать гипотезы, а далее выполнять, тестировать и корректировать их в повторяющемся цикле адаптации и совершенствования в соответствии с заданными человеком критериями эффективности. Установлено, что непрерывность циклов проверки гипотез в значительной степени отличает ЦД от традиционных методов моделирования, в которых каждая проверка требует существенных ресурсов и компетенций.

Экономическая эффективность ЦД СХ

Установлено, что экономика внедрения и использования ЦД является ключевым сдерживающим фактором их активной апробации в АПК нашей страны. Следовательно, важными являются выработка и принятие совершенно конкретных критериев и показателей, оценка которых отражает целесообразность и окупаемость инвестиций в ЦД. В данной связи нами обозначены потенциальные экономические эффекты, прямо или косвенно проявляющиеся при внедрении и функционировании ЦД СХ:

финансовая оптимизация показателей рентабельности бизнес-процессов: снижение затрат, увеличение добавленной стоимости продукции. Например, ЦД СХ позволит принимать экономически обоснованные решения по дозированному применению удобрений с учетом данных конкретных участков, вносить изменения в регламенты возделывания культур по объемам и видам удобрений на основе непрерывного обучения по ранее принятым решениям и с учетом ограничивающих факторов, таких как погода, рентабельность, коэффициент выполнения питательных веществ в почве и др.;

повышение производительности за счет экономии времени и оперативного (в том числе автоматизированного) принятия управленческих решений без технической необходимости личного присутствия и наблюдения. Например, ветеринары в режиме реального времени получают информацию о здоровье животных и принимают своевременные меры по лечению и профилактике. Значительно ускоряются составление и утверждение еженедельных планов управления полями при наличии их ЦД и т. д.;

сокращение (исключение) затрат на устранение критических факторов снижения урожайности и продуктивности, обусловленных характерными для АПК

рисками и высокой неопределенностью. Например, ЦД фермы обеспечивает прозрачность и прослеживаемость условий содержания и кормления животных и др.

В широком смысле моделирование ЦД СХ на макро- и мезоуровне имеет значительный потенциал разрешения острых проблем современной промышленной модели производства продовольствия (включая производство, переработку, логистику, потребление, утилизацию) с трансформацией линейных цепочек производства в экономически эффективные системы «замкнутого цикла», обеспечивающие минимизацию и исключение отходов и загрязнений, продолжительное хранение продуктов и восстановление природных экосистем [13].

Недостатки ЦД СХ

Анализ доказывает, что применение современных цифровых технологий (в том числе ЦД СХ) требует значительных затрат не только при разработке, приобретении, но и при эксплуатации (обслуживание, оплата труда IT-специалистов, доработка, интеграция с другими процессами и др.). В данной связи нами выделены следующие недостатки, сдерживающие научно-практическое внедрение и использование технологии в реальном секторе АПК [5, 6]:

1. Цена разработки ЦД (составление карт, схем, механизмов взаимодействия и влияния на объект моделирования, развертывание и подключение датчиков мониторинга состояния, алгоритмы преобразования данных, запуск цифровой системы и др.) может значительно превышать потенциальные выгоды внедрения даже в долгосрочном периоде. Так, значительная часть моделируемых ЦД СХ – это живые системы (животные, растения или скоропортящиеся продукты) со сложными процессами жизнедеятельности. Для их оцифровки отсутствуют явные финансовые стимулы окупаемости в короткие сроки. Это определяет как необходимость масштабирования решений в рамках крупных организаций, так и внедрения их стандартизированных вариантов во множестве малых однотипных структур с целью снижения стоимости использования ЦД на 1 руб. выручки продукции АПК.

2. Отдаленность специалистов АПК (в том числе агрономов, ветврачей и др.) от реальных процессов в отрасли отражает риск игнорирования неучтенных (неочевидных) факторов. Следовательно, активное использование ЦД для управления снижает внимание к реальным процессам сельскохозяйственного производства. Такое пренебрежение может привести к невозможным финансовым и репутационным потерям (например, снижение доверия к цифровым решениям и ожиданий от их внедрения). Важно учитывать риски крайних состояний развития ЦД СХ, отражающих либо отсутствие внимания к реальным системам, либо полное недоверие данным из компонентов ЦД. В этой связи на этапе проектирования ЦД СХ целесообразно закладывать напоминания о важности критического восприятия сведений из виртуальных моделей. Это позволит точно формировать понимание внутренней работы ЦД, планировать этапы

обслуживания и альтернативные способы управления, включая мониторинг и контроль данных.

3. Зависимость точности прогнозных состояний ЦД от объема и качества накопленной исторической информации о развитии моделируемого в виртуальной среде физического объекта. В данной связи возможные будущие преимущества могут не проявляться в краткосрочном периоде создания и развертывания, что при отсутствии практики накопления данных и «оцифровки» сельскохозяйственных объектов значительно сдерживает внедрение ЦД и потенциал их эффективного использования.

4. Непонимание сути ЦД, что ведет к ошибкам классификации общих компьютерных моделей в качестве ЦД, а также точности виртуальной копии реального физического объекта.

Практическое внедрение и использование ЦД СХ

В числе примеров работающих решений ЦД СХ нами выделены ЦД молочно-товарного производства Dairy Monitor (Connecterra B. V., Нидерланды); ЦД товарного сельскохозяйственного производства FarmTelemetry (Lesprojekt-Služby Ltd., Чехия); ЦД развития растений Open PD (Espiral Pixel, Португалия); ЦД пчелиных семей BeeZon (BeeZon Smart Software IoT Solutions, Греция); ЦД распространения вредителей OliFLY (Harpha Sea, d.o.o. Koper, Словения); ЦД запасов силосов для животноводства INSYLO (Ubikwa Systems, Испания) [5, 14, 15].

Развитие технологии ЦД в практической деятельности организаций АПК Беларуси нами предлагается выполнять в рамках последовательного внедрения простых элементов с постепенным расширением новыми компонентами, увеличением автономности и интеллектуальности моделей. Важно, чтобы каждый последующий шаг основывался на положительном опыте и результатах реализации предыдущих. При этом установлено, что на различных участках и в сферах сельскохозяйственного производства возможно параллельное выстраивание относительно независимых технологических решений создания специализированных ЦД СХ (в растениеводстве, механизации, животноводстве, логистике, бухгалтерии и др.). В среднесрочном периоде основная роль ЦД – это обеспечение экономически эффективного управления всей совокупностью бизнес-процессов предприятия. Согласно выполненным нами исследованиям, главный потенциал внедрения ЦД СХ заключается в повышении точности оценки вклада экономически значимых активов (запасы, основные средства, оборудование, земельные ресурсы и др.) предприятия в текущую деятельность с прогнозированием ожидаемых кратко-, средне-, долгосрочных результатов хозяйствования (выручка, прибыль, рентабельность и др.).

Долгосрочной целью интеграции технологии ЦД в товарное сельское хозяйство является объединение разрозненных и независимых программных решений

в интегрированную модель – цифровой двойник сельскохозяйственного предприятия (ЦД СХП). Это предполагает выстраивание архитектуры и комплекса подключаемых модульных ЦД (в том числе отдельных ферм, полей, техники и др.) с обучающими алгоритмами на основе AI. В широком плане модульный профиль взаимоувязанной системы ЦД СХП позволит в перспективе учесть максимально возможный перечень воздействующих факторов, в том числе данных о межполевой динамике потоков воды, дисперсии удобрений и выщелачивании питательных веществ, уровне грунтовых вод, наличии ирригационной инфраструктуры, а также исторических сведений о количестве удобрений и их влиянии на урожайность и др.

При этом реальное формирование, внедрение и интеграция модулей ЦД СХП предполагают широкий состав разработчиков: эксперты в предметных областях АПК (финансы, экономика, агрономия, ветеринария и др.), специалисты по датчикам и IoT, ML, AI и многие другие.

В качестве ключевого элемента для интеграции модулей ЦД СХП нами обоснована целесообразность разработки финансово-экономической платформы моделирования ЦД СХП (далее – Платформа) на базе формализованного перечня таблиц (бухгалтерских, налоговых, статистических, экономических, отраслевых и других форм отчетности), заполнение которых является обязательным в рамках нормативно-правового поля производственной деятельности сельскохозяйственной организации.

Разработка такой Платформы предполагает описание и кодирование: всего перечня вносимых и заполняемых первичных показателей таблиц; ячеек, граф, столбцов, строк, текстовых описаний для заполняемых в настоящее время отчетных и аналитических документов предприятий АПК; алгоритмов и моделей использования первичных показателей для расчета и заполнения форм и отчетов; интерфейсов вывода на печать, направления адресату и автоматического заполнения в представляемые формы через веб-ресурсы.

Это позволит, во-первых, сформировать стандартизированную систему поступления и использования данных, во-вторых, обеспечить единообразное цифровое представление для всех процессов организации, в-третьих, интегрировать работу пользователей с оборудованием, датчиками, данными и прогнозами, в-четвертых, повысить эффективность планирования и организации сельскохозяйственного производства.

Согласно выполненным нами исследованиям, используемая в настоящее время в организациях АПК республики система аналитической отчетности и бизнес-планирования в целом может быть оцифрована для формирования предлагаемой Платформы. Указанный комплекс данных в виде цифровой финансово-аналитической модели предприятия позволит построить базовый каркас Платформы с возможностью последовательного подключения всего необходимого перечня модулей ЦД СХП. В их числе нами выделены:

1. Модуль ЦД земельных ресурсов (растениеводство) «ЦД СХП(р)» с накоплением базы исторических данных об урожайности, севообороте, составе почв и других параметрах цифровых паспортов полей. Он предназначен для оценки и мониторинга использования производственно-хозяйственного потенциала земельных ресурсов (состояние почв, влажность и др.), прогнозирования объемов заготовки продукции растениеводства с учетом природно-климатических факторов, научно обоснованных и фактически выполненных агротехнических мероприятий (удобрения, средства защиты, эксплуатация и приобретение сельскохозяйственной техники и др.). Модуль «ЦД СХП(р)» обеспечит принятие экономически эффективных решений в части севооборота (максимизация выручки с учетом выполнения целевых объемных показателей) и затрат (технологии, использование собственных и приобретаемых материально-технических и прочих ресурсов).

Исследования доказывают, что ЦД СХП(р) является ключевым элементом модульной системы ЦД СХ. Земля – это базовый ресурс сельскохозяйственного производства с устойчивыми характеристиками в достаточно длительном интервале времени. Данные о почвах – приоритетный объект моделирования ЦД. Это требует наличия точной информации в части интенсивности и глубины обработки, истории внесения удобрений и средств защиты растений и др.

Значительный потенциал использования данных ЦД СХП(р) можно отметить при моделировании износа и работоспособности техники и оборудования в местных условиях на основе аппроксимации имеющейся информации. Например, «протестировать» комбайн и другую технику перед покупкой в условиях, максимально приближенных к производственным особенностям реального хозяйства (с учетом различных погодных сценариев, параметров расхода топлива, эксплуатационных затрат, рисков повреждения насаждений и др.).

Важно отметить, что в Беларуси созданы и поддерживаются базовые элементы национальной системы управления почвенным плодородием. Она включает областные службы агрохимического и радиологического обследования, республиканский банк данных показателей почв, автоматизированную электронную систему моделирования почвенного плодородия с расчетом ежегодной потребности регионов республики в удобрениях и известковании. Ранее нами показана актуальность совершенствования указанной системы с разработкой дорожной карты ее развития (семь этапов) [16]. Предполагается, что ее реализация обеспечит полный комплекс прикладных решений для внедрения ЦД СХП(р) на всех уровнях сельскохозяйственного производства (предприятие, регион, область, республика).

2. Модуль ЦД стада (ферма) «ЦД СХП(ф)». Позволяет проводить постоянный мониторинг (на основе информации с датчиков на животном или внутри него, например акселерометров, болюсов и др.) и прогнозирование эффективности производства молока и мяса с учетом параметров здоровья скота. В числе

важных элементов ЦД фермы можно выделить: удаленный контроль здоровья, прогноз даты начала и определение охоты (на основе мониторинга поведения животного), автономное формирование рекомендаций по оптимизации молочно-товарного производства. Непрерывный поток данных с физических объектов (кормление, доение и др.) обеспечит точное прогнозирование экономических показателей с учетом рисков и динамики развития технологических процессов с целью оперативного реагирования в части повышения продуктивности стада и эффективности производства.

3. Модуль ЦД товаров «ЦД СХП(т)», используемых и выпускаемых в сельскохозяйственном производстве (семена, удобрения, средства защиты, технологии, сырье, продовольствие и др.). Для семян, например, это предполагает моделирование развития растения в конкретных условиях, урожайности с учетом различных природных и географических факторов (состав почв, нормы посева, алгоритм защиты, удобрения, вегетационный период, потребность в солнечном свете, жидкости и т. д.) для предлагаемой технологии возделывания [5]. Такие ЦД позволяют создавать высокоточные прогнозы объемов производства (в натуральном выражении) и экономически оптимизировать затраты ресурсов по критерию эффективности.

Преимущества формирования ЦД СХП(т) для производимых в республике семян, культур, животных, техники, оборудования и т. д. определяются значительным ростом их конкурентоспособности за счет детальной и объективной демонстрации покупателю будущих выгод от потребления (использования) конкретного вида продукции (в заданных для модели ЦД условиях). Можно также утверждать, что ЦД СХП(т) обоснованно признавать важным фактором развития точного земледелия. Так, информация о производительности семян в исторической динамике (объемы, сорта, всхожесть, вегетативные состояния, рост корней, использование питательных веществ и влаги, размеры и др.) для выращиваемых культур позволяет формировать цифровую экосистему, данные которой обеспечивают точное прогнозирование каждого следующего производственного цикла.

В республике базовые основы развития ЦД СХП(т) реализованы в рамках системы электронной паспортизации товаров ePass.by. Ее возможности позволяют создавать модельные сценарии, наполнять их значимыми статистическими показателями и переменными, осуществлять цифровое прогнозирование и планирование состояний ЦД СХП, высокоточное предсказание периодов и объемов конкретных технологических операций и процессов. При этом для развития ЦД СХП(т) на базе действующей системы ePass требуется разработка и внедрение прогнозно-аналитических моделей, включающих:

- конъюнктуру и динамику цен (исторических и прогнозных);
- описания (качественные и количественные) фактических и ожидаемых параметров (условия, технология, выгоды, потенциал урожайности и т. д.) производства и использования товара в разрезе стадий их жизненного цикла;

расширенные возможности по привязке сертификатов, уведомлений о соответствии, деталей прослеживаемости, правил (умных контрактов) по поставкам, платежам и повторным заказам с учетом остатков, геолокации и др.

Так, стоимостные данные (включая затраты на приобретение материально-технических ресурсов и прогноз выручки от реализации продукции) и состояние товара на стадиях его производства и использования позволят полноценно включать модуль ЦД СХП(т) в единую Платформу моделирования аграрного производства.

4. Модуль ЦД цепочек поставок (логистика: сбыт, склад, транспорт, условия платежей и др.) «ЦД СХП(л)». Обеспечивает моделирование оптимальных сроков, каналов, условий и объемов поступления, хранения, выбытия материально-технических средств, ресурсов и конечных товаров (приобретение, перемещение и реализация) с целью максимизации выручки при минимальных торгово-логистических затратах.

5. Модуль ЦД природно-климатических условий (климат) «ЦД СХП(к)». В НАН Беларуси широкие компетенции в данной сфере сконцентрированы в Институте природопользования. ЦД СХП(к) обеспечивает корректировку объемов сельскохозяйственного производства с учетом влияния фактических и прогнозных погодных факторов (солнечный свет, осадки, температура и др.). Важное преимущество такого двойника – формирование оперативных и своевременных оповещений об отклонениях погоды от ожидаемых условий с целью принятия экстренных решений экономического и организационно-технологического характера. Интеграция модулей ЦД СХП(к) с ЦД почв и товаров (например, семян, включая технологию возделывания) позволит отбирать оптимальные сорта и предлагать структуру посевов с учетом исторического массива данных о погоде. Результат – непрерывный мониторинг, прогнозирование и планирование финансово-хозяйственных результатов деятельности организации.

В качестве актуального примера следует указать глобальный проект, реализуемый в ЕС, – Destination Earth (DestinE). Его цель – разработка высокоточной цифровой модели прогнозирования последствий влияния человека на климат в мировом масштабе для тестирования сценариев устойчивого развития, поддержки и оценки эффективности экологической политики ЕС [17]. Заявляется создание виртуального двойника Земли (мониторинг и моделирование природных явлений в атмосфере, океанах, льдах и на суше во взаимосвязи с деятельностью человека), с помощью которого можно будет прогнозировать экстремальные явления, включая наводнения, засуху и пожары, на различных временных горизонтах (в том числе в течение нескольких лет). Применение подобных двойников, построенных учеными-климатологами, на практике имеет высокий потенциал для сельского хозяйства (оценка рисков наводнений, засухи, экстремальных температур, миграция объектов флоры, фауны и др.).

6. Другие модули ЦД (объекты машинно-тракторного парка, распространения вредителей, развития пчелиных семей, сада, ландшафтов, орошения, энерго-

потребления и др.). В числе актуальных направлений разработки ЦД СХП следует выделить контролируемую среду выращивания, например тепличное земледелие, аквакультуру.

Развитие и использование ЦД СХП предполагает в первую очередь сбор и накопление релевантных данных для выделения и описания наиболее значимых факторов влияния. Это позволит строить высокоточные прогнозы урожайности и объемов производства, контролировать и сопоставлять фактические сведения с заданными целевыми значениями, своевременно информировать о рисках, оперативно принимать упреждающие решения по критериям максимизации эффективности (в том числе удаленно).

Важным преимуществом ЦД СХП является непрерывный характер выполнения операций мониторинга, контроля и прогнозирования. Это позволяет заинтересованным сторонам анализировать ожидаемые отклонения и оперативно изменять параметры стратегического управления. Например, в случае конъюнктурных сдвигов ЦД СХП(т) уведомит производителя о необходимости принять решение о корректировке сроков, условий и структуры продаж, закупок, поставок.

Принципы построения ЦД СХ

Установлено, что ограниченное использование решений ЦД СХП в реальном секторе отражает ситуацию, в которой большинство технологий сельскохозяйственного производства (включая технологические регламенты) до настоящего момента не смоделированы в цифровом виде. Это не позволяет оптимизировать процессы принятия решений и увеличивать долю созданной в сельском хозяйстве добавленной стоимости на базе активного внедрения ЦД СХП. В данной связи нами выделены:

принцип автоматизации мониторинга. Критически важно наращивать использование систем сбора и анализа множества данных с использованием интернета вещей, датчиков, сканеров, автоматического скрининга и обработки информации с использованием AI и ML. Установлено, что именно алгоритмы отслеживания с оценкой (что и почему произошло) делают возможной дальнейшую автоматизированную перенастройку ЦД СХП;

принцип повышения достоверности прогнозирования на основе машинного обучения. Осуществляется на базе предыдущего принципа, обеспечивающего диагностику рисков и потенциальных проблем. Позволяет формулировать оптимальные предложения и рекомендации по предотвращению критических сбоев функционирования оперативного и стратегического характера. Важно отметить, что анализ данных и моделирование целесообразно выполнять с использованием безопасных (защищенных) вычислительных мощностей в локальной либо национальной облачной инфраструктуре;

принцип приоритетности моделирования известных критических точек и рисков устойчивости. Это позволяет в условиях конкретных хозяйств и территорий

измерять и прогнозировать параметры сохранения качества почв и продуктивности животных с учетом уровней интенсификации производства, применяемых технологий, кадрового потенциала, природного и антропогенного воздействия и других актуальных факторов влияния.

Инфраструктура ЦД СХП

Выполненный нами анализ доказывает, что эффективная реализация ЦД СХП предполагает широкое использование современных технологий, включающих датчики (виды, количество, периодичность измерения), модели (алгоритмы мониторинга, анализа, оптимизации и прогнозирования) и интерфейсы (пользовательские, промышленные, обеспечивающие регистрацию, отправку в базу данных и другие операции).

Датчики обеспечивают поступление данных для мониторинга (в реальном времени, в том числе на основе спутниковых данных) сельскохозяйственной техники, энергопотребления, здоровья и поведения сельскохозяйственных животных, состояния полей и посевов, уровня влаги и других параметров для принятия управленческих решений. В сельском хозяйстве современные датчики позволяют отслеживать углерод, биоразнообразие, опылителей, состояние водных ресурсов и многое другое. Основная цель датчиков – считывание фактических состояний физических объектов для их дальнейшего сравнения с прогнозируемыми параметрами виртуальных двойников. При этом очевидно, что чем крупнее компания, тем важнее становится понимание данных. В этой связи значительно повышается роль моделирования и обучаемости ЦД.

Модели (методы, алгоритмы) позволяют:

- накапливать и учитывать данные мониторинга;
- точно анализировать и прогнозировать сбои в функционировании реальных физических систем;
- осуществлять удаленный анализ и моделирование (например, здоровья животных);
- своевременно обнаруживать и предупреждать критичные сбои и возможные отклонения от целевых параметров;
- моделировать сценарии типа «что, если?» и др.

Основная цель – прогнозное обучаемое моделирование на основе постоянного динамического сравнения с фактическими данными. Это обеспечивает перестроение параметров для будущих состояний ЦД в любых заданных интервалах времени. Поэтому алгоритмы моделей целесообразно формировать на базе инструментов оптимизации, обучения и динамического обновления с выходом на интерфейсы интеграции с датчиками, применяемой техникой, технологиями и взаимодействия с пользователями.

Интерфейсы – инструменты (программы, команды и другие способы) считывания, перемещения, синхронизации и визуализации данных, команд и решений

(технологии дополненной, виртуальной реальности, обработка голосовых и текстовых сообщений, распознавание действий, личности, управление жестами), обеспечивающие «бесшовную» интеграцию человека и машины. В числе актуальных решений можно выделить дашборды для руководителей, обобщающие и выводящие на монитор в приемлемом виде весь набор данных с полевых, технических, животноводческих и других информационных систем и датчиков, в том числе прогнозы и отклонения фактических значений от моделируемых ЦД СХП. Интерфейсы позволяют выстраивать взаимодействие с ЦД через визуальные программные модули (блоки) на телефоне, планшете или компьютере. На экраны выводится информация о статусе объекта, его истории (например, о здоровье животного) или его прогнозируемом состоянии (например, относительно роста урожая).

Важно отметить, что роль интерфейсов взаимодействия человека с приложениями ЦД СХП остается ключевой в рамках контроля и принятия решений по производственным процессам и процедурам. Так, большинство стандартизированных и рутинных операций моделирования ЦД СХП могут выполняться в автоматическом режиме без вмешательства человека (например, остановка техники при обнаружении рисков, краткосрочные и локальные корректировки объемов вносимых средств защиты и удобрений при изменении других влияющих факторов). Вместе с тем установлено, что интерфейсы важно формировать таким образом, чтобы сохранить возможность отключения «автопилота» с передачей функций принятия решений конкретному пользователю [13].

Интерфейсы ЦД СХП критически важны для выстраивания безопасной производственной среды и рабочих мест в сельском хозяйстве, сохранения ресурса оборудования и снижения непродуктивного выбытия скота. Например, контроль за работниками в процессе их труда, положения живых объектов, опасных предметов и т. д. обеспечивает снижение травм, поломок и других непроизводственных затрат.

Важное значение имеют также интерфейсы синхронизации между физическими и виртуальными двойниками, которые обеспечивают работу моделей динамического обучения ЦД СХП. При этом значительной сложностью отличаются задачи синхронизации ЦД для природных и биологических объектов (животные, земельные участки и др.), в том числе при использовании различных инфраструктур, программного обеспечения и противоречивых требований конечных пользователей.

Установлено, что указанные выше технологические элементы ЦД СХП в целом позволяют развивать весь спектр возможностей их использования в сельскохозяйственном производстве с непрерывным потоком операций.

Заключение

Таким образом, исследование показывает, что технология цифровых двойников может быть реализована в АПК нашей страны на основе Платформы, обеспечивающей формирование и интеграцию сети взаимосвязанных ЦД СХП

(в растениеводстве, животноводстве, механизации и т. д.), которые прогнозируют (с учетом данных автоматического мониторинга в режиме реального времени) состояния физической системы в виртуальной среде. Такая модульная Платформа представляет собой многомерную копию физической системы, включающую ее основные свойства и состояния, а также векторы воздействий на отдельные модули в любой точке цикла прогнозирования. При этом в качестве принципиального отличия ЦД от статических имитационных моделей, воспроизводящих физические системы, нами выделена динамическая оптимизация алгоритмов прогнозирования на основе фактических данных мониторинга при сопоставлении реального состояния с прогнозным виртуальным объектом и последующей автоматической переоценкой целевой модели для запрашиваемой точки временной оси.

Использование Платформы позволит формировать, анализировать и контролировать достижение прогнозных экономических показателей, выявлять причины отклонений и оперативно предлагать перечень оптимальных решений для устранения критических рисков. В данной связи классическое бизнес-моделирование в Платформе трансформируется в динамическую бизнес-модель развития сельскохозяйственного производства.

Содержание и наполнение Платформы и модулей ЦД СХП предложено формировать на основе действующих систем бухгалтерского, налогового и статистического учета с выходом на взаимоувязанные планы социально-экономического развития предприятия (1, 3, 5 лет и более) и критерии оценки деятельности руководителя (для начисления квартальных и годовых бонусов).

Накопление в Платформе данных, поступающих от модулей ЦД СХП, позволит оперативно формировать прогнозные показатели с учетом отклонений от плановых значений по итогам целевого периода. Оперативное принятие управленческих решений будет способствовать устойчивости контролируемых подсистем сельскохозяйственного производства. Важнейшее преимущество предложенной нами модульной схемы внедрения ЦД СХ – это целевое и последовательное освоение отдельных блоков с детальным прогнозом, анализом экономических выгод и «наладкой» до требуемого уровня эффективности. В данной связи наиболее приемлемым сценарием развития ЦД СХП являются варианты внедрения от более простых с меньшим количеством данных к более сложным с постепенным добавлением компонентов и функций, расширяющих потенциал ЦД.

В числе значимых результатов внедрения ЦД следует привести сокращение затрат, эффект масштаба, минимизацию рисков (экологических, конъюнктурных, технологических и др.), повышение безопасности труда и т. д. Моделирование ЦД живых систем, таких как растения и животные, позволит осуществлять раннее выявление болезней, оптимизацию производства за счет определения факторов, ухудшающих продуктивность (управление фермой) и урожайность

(управление полем). Для конечной продукции достигается экономия логистических затрат и повышение качества.

ЦД обеспечивают ряд преимуществ для экономики, общества и окружающей среды. В сельском хозяйстве ЦД могут облегчить удаленный мониторинг сельскохозяйственных культур, состояния почвы, а также управления животноводством и фермой, где они способны устранить ограничения по месту и времени, с которыми сталкиваются люди.

Выполненное нами исследование показало ограниченный объем публикаций и данных, отражающих фактические результаты внедрения ЦД СХ с указанием оценки их экономической эффективности. Вместе с тем анализ подтверждает, что текущий уровень технологий позволяет создавать и использовать ЦД СХ повсеместно (с учетом различных пространственных и временных масштабов, уровней сложности, количества компонентов и датчиков, целевой функциональности и др.).

Установлено, что в настоящее время в практическом плане в цифровом формате могут быть смоделированы следующие физические системы АПК:

живые растения или деревья, животные, сельскохозяйственная продукция; поля, агропромышленные предприятия, ландшафты, хозяйственные постройки, теплицы, сельхозтехника, включая оборудование, а также цепочки поставок продуктов питания и логистика.

Вместе с тем установлено, что ЦД, которые непосредственно моделируют процессы роста и жизнедеятельности живых объектов (стадо, поле, ферма и др.) с высокой степенью неопределенности, целесообразно создавать на начальных этапах с меньшей технической детализацией. Тогда как механические и технические объекты (например, ЦД сельскохозяйственной техники, цепочек поставок пищевых продуктов и логистики) могут быть продублированы в цифровой форме со значительно более высокой точностью (в том числе алгоритмами прогнозирования), отражающей наличие детальной информации о их конструкции и работе.

В числе ограничений и препятствий развития ЦД нами выделены высокая стоимость разработки и внедрения, снижение роли непосредственного присутствия специалистов для оценки состояния физической системы, недоступность, недостаточность и недостоверность информации, ограничение источников поступления данных.

В качестве важных отличительных преимуществ ЦД от других моделей нами выделены:

снижение (для пользователя) технической сложности моделирования, мониторинга, циклов оценки и интерпретации;

возможность принимать решения об изменении реального мира на основе его цифровой копии;

динамичность состояния ЦД в реальном времени с точным отражением текущего статуса реального объекта.

Для устранения противоречий отнесения конкретной технологии к концепции ЦД предложено оценивать наличие одновременно трех основных инфраструктурных элементов (систем): датчиков, моделей и интерфейсов. Это обеспечивает поддержку принятия решений не только на основе прошлых данных, но и с учетом будущих предсказанных состояний ЦД на базе компонентов компьютерного нейросетевого моделирования.

Актуальность создания и развития эффективных систем обучения и прогнозирования состояний различных элементов ЦД СХП характеризуется наличием потенциала роста продуктивности сельскохозяйственного производства при формировании и внедрении самообучающихся ЦД с автоматизированной адаптацией прогнозных моделей двойника на основе расхождения фактических данных с датчиков с плановыми показателями состояний системы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Kshetri, N. B. The Economics of Digital Twins [Electronic resource] / N. B. Kshetri / NC Docks digital online collection of knowledge and scholarship. – Mode of access: https://libres.uncg.edu/ir/uncg/f/N_Kshetri_Economics_Digital_2021.pdf. – Date of access: 15.08.2023.
2. Digital Twin Market Size worth US\$ 95 Billion by 2033 at of CAGR 34.3%: Fact.MR Research [Electronic resource] / GlobeNewswire. – Mode of access: <https://www.globenewswire.com/news-release/2023/01/18/2591244/0/en/Digital-Twin-Market-Size-worth-US-95-Billion-by-2033-at-of-CAGR-34-3-Fact-MR-Research.html>. – Date of access: 01.08.2023.
3. Digital Twin Market Outlook (2023-2033) [Electronic resource] / Fact.MR. – Mode of access: <https://www.factmr.com/report/digital-twin-market>. – Date of access: 03.08.2023.
4. Pylianidis, C. Introducing digital twins to agriculture [Electronic resource] / C. Pylianidis, S. Osinga, I. N. Athanasiadis // Computers and Electronics in Agriculture. – 2021. – № 184. – Mode of access: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169920331471>. – Date of access: 17.08.2023.
5. Purcell, W. Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-art review [Electronic resource] / W. Purcell, T. Neubauer // Smart Agricultural Technology. – 2023 – № 3. – Mode of access: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375522000594/pdf?md5=fa6cde245acbbb44b36cfa55df3801ea&pid=1-s2.0-S2772375522000594-main.pdf>. – Date of access: 07.08.2023.
6. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review [Electronic resource] / D. Jones [et al.] // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2020. – № 29. – Mode of access: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581720300110>. – Date of access: 09.08.2023.
7. Grieves, M. Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management / M. Grieves. – Cocoa Beach, FL: Space Coast Press, 2011. – 370 p.
8. Grieves, M. Digital twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication [Electronic resource] / M. Grieves // Research Gate. – Mode of access: https://www.researchgate.net/profile/Michael-Grieves/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication/links/5535186a0cf23947bc0b17fa/Digital-Twin-Manufacturing-Excellence-through-Virtual-Factory-Replication.pdf. – Date of access: 11.08.2023.
9. Grieves, M. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems [Electronic resource] / M. Grieves, J. Vickers // Springer Link. – Mode of access: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-38756-7_4. – Date of access: 15.03.2022
10. Stark, R. Digital Twin [Electronic resource] / R. Stark, T. Damerou // CIRP Encyclopedia of Production Engineering. – 2019. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16870-1. – Date of access: 07.08.2023.

11. Цифровая трансформация. Термины и определения: СТБ 2583-2020 [Электронный ресурс]. – Введ. 01.03.2021. – Режим доступа: <https://nasb.gov.by/rus/activity/nauchno-metodicheskoe-obespechenie-razvitiya-informatizatsii>. – Дата доступа: 07.08.2023.

12. Цифровая трансформация. Основные понятия и терминология: сб. ст. / Нац. акад. наук Беларуси, Объед. ин-т проблем информатики; редкол.: А. В. Тузиков (пред.) [и др.]. – Минск: Беларусь. наука, 2020. – 267 с.

13. Digital twin paradigm: A systematic literature review [Electronic resource] / C. Semeraro [et al.] // Computers in Industry. – 2021. – № 130. – Mode of access: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166361521000762>. – Date of access: 17.08.2023.

14. Matanat, R. Why Modern Farming Need the Digital Twins [Electronic resource] / R. Matanat // Challenge advisory LLP. – Mode of access: <https://www.challenge.org/knowledgeitems/why-modern-farming-need-the-digital-twins>. – Date of access: 15.08.2023.

15. Verdouw, C. N. Digital twins in farm management: illustrations from the FIWARE accelerators SmartAgriFood and Fractals [Electronic resource] / C. N. Verdouw, J. W. Kruize // Conference paper: 7th Asian-Australasian Conference on Precision Agriculture, Hamilton, 16–18 October, 2017. – Mode of access: https://www.researchgate.net/profile/Cor-Verdouw/publication/322886729_Digital_twins_in_farm_management_illustrations_from_the_FIWARE_accelerators_SmartAgriFood_and_Fractals/links/5b2cf5eaaca2720785d7c121/Digital-twins-in-farm-management-illustrations-from-the-FIWARE-accelerators-SmartAgriFood-and-Fractals.pdf. – Date of access: 15.08.2023.

16. Национальная система управления почвенным плодородием Республики Беларусь: текущее состояние и перспективы развития / В. В. Лапа [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2021. – Т. 59, № 3. – С. 292–303.

17. Destination Earth [Electronic resource] / European Commission. – Mode of access: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/destination-earth>. – Date of access: 14.08.2023.

Поступила в редакцию 29.08.2023

Сведения об авторе

Пилипук Андрей Владимирович – директор, доктор экономических наук, профессор, член-корреспондент

Information about the author

Pilipuk Andrei Vladimirovich – Director, Doctor of Economic Sciences, Professor, Corresponding Member