

Kulakova Ekaterina Sergeevna, Head of the Department of Environmental Technologies of Nature Management, Faculty of Forestry, Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A. K. Kortunov – the branch of the federal state budgetary educational institution of higher education «Don State Agrarian University» (Russian Federation, 346400, Novocherkassk, Pushkinskaya str., 111), ORCID: 0000-0001-6778-1401, e-mail: kes_9@mail.ru

DOI: 10.32786/2071-9485-2024-03-19

THE CONCEPT OF A DIGITAL TWIN OF IRRIGATED AGROCECENOSIS

Borovoy S. E., Komarova O. P., Kozenko K. Y.

*All-Russia Institute of Irrigated Agriculture
Volgograd, Russian Federation*

Corresponding author E-mail: komarova62@rambler.ru

Received 11.10.2023

Submitted 25.04.2024

Summary

Paper analyzes state-of-the-art publications in the field of agricultural application of digital twins and presents an author's concept of developing a digital twin of an agricultural landscape in the field of precision irrigation with a description of its system architecture based on cyber-physical data integration, which allows parametric modeling of water, soil and vegetation agroecosystem parameters in order to work out what-if scenarios in a digital environment.

Abstract

Introduction. An implementation of precision farming technologies, with other equal yield-forming factors, allows to increasing a yield of agroecosystem up to 15-20%. The introduction of precision irrigation makes it possible to qualitatively increase the efficiency of using of water resources. Implementation of digital twins opens up significant opportunities in reducing the parametric uncertainty of agroecosystem states and their real-time monitoring, as well as high-precision modeling of various simulation scenarios. **Object.** The object of this study are digital twins as systems for monitoring and parametric modeling of production processes in their application to the agricultural sector. **Materials and methods.** Methods of this study are general systems theory, the theory of constraints, technology maturity assessment according to foreign and Russian industry standards, also the monographic method were used. **Results and conclusions.** The concept of an object-oriented data model is proposed that integrates data of various physical nature and automates parametric modeling of agroecosystem, which will qualitatively reduce the uncertainty in the economic parameters of agroecosystem in a discrete spatial and temporal dimension, as well as labor costs for calculations, as well as form a primary calculating system and methodological basis to integrate precision irrigation, precision farming and crop programming with further use of the research results in cyber-physical systems, including an implementation of artificial intelligence.

Keywords: precision agriculture, precision irrigation, digital twins in agriculture, cyberphysical systems in agriculture.

Citation. Borovoy S. E., Komarova O. P., Kozenko K. Y. The concept of a digital twin of irrigated agroecosystem. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2024. 3(75). 165-174 (in Russian). DOI:10.32786/2071-9485-2024-03-19.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

УДК 631.6

КОНЦЕПЦИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ОРОШАЕМОГО АГРОЦЕНОЗА

Боровой С. Е., младший научный сотрудник

Комарова О. П., кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник

Козенко К. Ю., кандидат экономических наук, старший научный сотрудник

*Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия
г. Волгоград, Российская Федерация*

Актуальность. Внедрение технологий прецизионного земледелия, при прочих равных урожайнообразующих факторах, позволяет увеличить урожайность агроценоза до 15-20%. Внедрение прецизионного орошения позволяет качественно увеличить эффективность использования водных ресурсов. Использование цифровых двойников открывает значительные возможности в сокращении параметрической неопределенности состояний агроценоза и их мониторинга в реальном времени, а также высокоточное моделирование различных имитационных сценариев. **Объект.** Объектом исследования являются цифровые двойники как системы мониторинга и параметрического моделирования производственных процессов в их применении к сельскохозяйственной сфере. **Материалы и методы.** Применялись методы общей теории систем, теории ограничений, оценки зрелости техно-

гий по зарубежным и российским отраслевым стандартам, а также монографический метод. **Результаты и выводы.** Предложена концепция объектно-ориентированной модели данных, интегрирующей данные различной физической природы и автоматизирующей параметральное моделирование агробиоценоза, что позволит качественно сократить неопределенность в экономических параметрах агроценоза в дискретном пространственном и временном измерении, а также трудозатраты для проведения расчетов. А также позволит сформировать первичный расчетный и методологический базис для интеграции прецизионного орошения, прецизионного земледелия и программирования урожая с дальнейшим использованием результатов исследования в киберфизических системах, в том числе с применением искусственного интеллекта.

Ключевые слова: прецизионное земледелие, прецизионное орошение, цифровые двойники в сельском хозяйстве, киберфизические системы в сельском хозяйстве.

Цитирование. Боровой С. Е., Комарова О. П., Козенко К. Ю. Концепция цифрового двойника орошаемого агроценоза. *Известия НВ АУК*. 2024. 3(75). 165-174. DOI: 10.32786/2071-9485-2024-03-19.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении или анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. Формирование современного цифрового сельского хозяйства можно охарактеризовать как процессы диффузии и адаптации в сельскохозяйственной отрасли программно-аппаратных решений, реализующихся и реализованных в рамках концепций «Индустрии 4.0».

Факторами цифровой модернизации сельского хозяйства является необходимость оптимизации эффективности производственных технологий при одновременной необходимости снижения налагаемого на окружающую среду антропогенного бремени, в частности сокращения пестицидной нагрузки, предотвращения физической и биологической деградации почв, в том числе за счет оптимизации использования оросительной воды. Особо важным фактором является и необходимость повышения рентабельности сельскохозяйственного производства, в том числе за счет развития экспорта продукции, что едва ли представляется возможным без широкого внедрения цифровых, прецизионных технологий в земледелии и орошения как базиса их устойчивого развития. Проблематика цифровизации, как на уровне сельскохозяйственных производственных процессов в целом, так и в разработке цифровых двойников агроценоза в частности, является новым и достаточно слабо исследованным направлением и в мировой науке [2, 17, 19], в российских же работах эта тема пока что представлена еще более фрагментарно [21-24], что придает актуальность исследованиям данной темы даже на первоначальном, концептуально-теоретическом уровне.

Материалы и методы. В работе были использованы методы общей теории систем, теории ограничений, оценки зрелости технологий по зарубежным и российским отраслевым стандартам, а также монографический метод.

Результаты и обсуждение. Среди макроэкономических процессов, формирующих институциональные и производственно-технологические группы факторов внешней среды российского АПК в целом и орошаемого земледелия в частности, необходимо выделить три главных детерминанты: 1. Процессы международно-политической турбулентности, реализация страновых и логистических рисков на внешних рынках продовольствия, что преобразует объемы и устойчивости поставок продовольствия из чисто экономических отношений в стратегический инструмент внешней политики РФ. 2. Климатические процессы, которые, безотносительно реальной степени их антропогенности, оказывают существенное негативное влияние на устойчивость земледелия в целом, что качественно повышает значимость развития оросительных мелиораций как в экстенсивном, так и в интенсивном отношении. На уровне же регионального аспекта развития агроэкономики особым значением обладает проблематика достаточности водных ресурсов. С одной стороны, это ставит задачи повышения эффективности их использования, прежде всего за счет капельного и внутрипочвенного орошения, с другой стороны, наличествует необходимость освоения обширных водных ресурсов Волго-Донского междуречья и Нижнего Поволжья в целом, что позволит эффективно дополнить орошаемые агроценозы Краснодарского края, возможности дальнейшего развития которых ограничены нехваткой свободных оросительных вод в Кубани, Тереке, Сосыке и других реках Кубанского бассейнового округа. 3. Технологические процессы интенсификации сельскохозяйственного производства и необходимость его диверсификации: нарушение баланса между растениеводством и животноводством не в

пользу последнего, с одной стороны, а в самом растениеводстве – преобладание озимой пшеницы образует весьма далекую от оптимума системную архитектуру сельского хозяйства, ограничивающую как устойчивость производства за счет погодных факторов, так и его экономические показатели. Пшеница в сравнении с другими культурами обладает наименьшей погектарной выручкой и показателями добавленной стоимости, обеспечивая прибыль не более 300-400 USD с 1 га пашни, в то время как, например, соя и кормовые травы обладают наивысшей рентабельностью и потенциалом технологической интенсификации производства. Системная же интеграция кормопроизводства в орошаемых агроценозах и животноводства позволяет извлекать с 1 га 3 и более тыс. USD прибыли, что позволяет придать качественный импульс и развитию сельских территорий, обеспечив купирование сдерживающих развитие РФ пространственно-территориальных и социально-экономических диспропорций.

Комплексным и системным ответом на вызовы, сформированные этими тремя детерминантами, является адаптация орошаемого земледелия к комплексу прецизионных цифровых программно-аппаратных решений, связанных с т.н. «Индустрией 4.0.», находящей свое применение в сельском хозяйстве в следующих направлениях, которым присущ взаимоопорный характер:

1. Прецизионное земледелие, основными формами которого являются средства прецизионной навигации для сельскохозяйственной техники, обеспечивающей физический оптимум однородности посевов, и прецизионному внесению удобрений, обеспечивающему химический оптимум потребности растений в NPK.

2. Прецизионное орошение, обеспечивающее растениям водный оптимум, а сельхозтоваропроизводителям – экономический оптимум рентабельности.

3. Дистанционное зондирование агроландшафтов, обеспечивающее оптимум сокращения трудозатрат на отбор проб и образцов и их лабораторное исследование конвенциональными методами, а также, что не менее важно, обеспечивающее качественное сокращение неопределенности в риал-тайм мониторинге происходящих в агроценозе физических, химических и биологических процессов, что позволяет, при прочих равных, обеспечить повышение урожайности на 15-25% посредством высокоточного и ресурсосберегающего купирования факторов водного и трофического стресса растений.

Средствами реализации дистанционного зондирования агроландшафтов являются высокоточные средства фотограмметрии, осуществляемой преимущественно с применением БПЛА-платформ, что позволяет осуществить репрезентацию агрофитоценоза в виде массива воксельных данных (присваивающих каждому пикселю аэрофотосъемки с разрешением ~1 см трехмерные координаты) и мультиспектральных/гиперспектральных данных (отображающих вегетационные индексы растительности, спектральному диапазону которых присущи устойчивые корреляции с различными факторами стресса растений). Не менее важным и перспективным аспектом дистанционного зондирования, системно дополняющим аэрофотосъемку, является автоматизация трудоемких наземных измерений NPK, объемной влажности, матричного потенциала почвы, осуществляемая посредством беспроводных датчиков, интегрированных в киберфизическую систему через т.н. «интернет вещей» (Internet of Things, IoT) с использованием LPWAN/LoRaWAN протоколов. В аспекте программно-аппаратных решений сочетание данных методов позволяет полноценно реализовать концепцию «электронного агронома», сформулированную в 1955 г. академиком АН СССР А.Ф. Иоффе, через современные программно-аппаратные средства осуществив репрезентацию агрофитоценоза как системы квазиоднородных участков произвольного (детерминированного задачами и возможностями системы) размера. Данные участки, в свою очередь, в аспекте модели данных представляют собой привязанные к GPS-координатам дата-кубы, обладающие определенным комплексом параметров, интегрирующим данные различной физической природы, поступающие через инструменты дистанционного зондирования и, опционально, интерпретируемые с помощью алгоритмов искусственного интеллекта, формирующих интеллектуальную информационную систему (в качестве альтернативных названий которой также употребляются «информационно-советующая система» или же «система поддержки принятия решений»). Безотносительно терминологических альтернатив, задачами такого рода систем является обеспечение в ядре системы максимального сокращения параметрической неопределенности протекающих в агроценозе процессов, а в периферии системы – обеспечение эффективных интерфейсов ввода и репрезентации данных параметров, что позволяет принимать наиболее эффективные агрономические решения и также сокращает затраты квалифицированного труда на сбор данных для их принятия.

В аспекте же общетеоретического аппарата, описывающего цифровые решения, связанные с индустрией 4.0, такую систему можно охарактеризовать и как цифровой двойник агроценоза.

Концепция цифрового двойника как программной среды киберфизического моделирования какого-либо изделия или производственного процесса в комплексе факторов была впервые введена в научный оборот М. Гривзом и Дж. Викерсом в 2014 году [5]. Единое и стандартизированное понятие цифрового двойника с данного момента еще не выработалось, представляя собой достаточно нечеткую категорию. Тем не менее, в англоязычной научной литературе она всегда связана с квалифицирующими признаками динамической цифровой репрезентации физического объекта или системы, позволяющей осуществлять численные эксперименты, с достаточной для поставленных задач достоверностью моделирующие те или иные what-if решения [13].

Практическое же внедрение цифровых двойников за эти годы главным образом связано с высокотехнологичной промышленностью: аэрокосмической отраслью, автомобилестроением [10], трехмерной печатью [9].

Тема цифрового двойника является достаточно новой и для промышленной инженерии, позволяя оптимизировать трудовые и ресурсные затраты на НИОКР за счет качественно нового уровня имитационного моделирования в цифровой среде, позволяющей сократить затраты на изготовление различных образцов и прототипов [15].

В аграрной же сфере, которая в силу своей пространственной рассредоточенности и меньшей концентрации капиталов в целом отстает от промышленного сектора во внедрении инноваций, имплементация технологий цифрового двойника находится преимущественно в ранних стадиях жизненного цикла разработки и внедрения [6]. Основные направления данных разработок связаны с искусственным интеллектом и машинным распознаванием образов для прецизионного земледелия [12], использованием больших данных [19] и интернета вещей в сельском хозяйстве [2].

Так, например, в наиболее релевантной по содержанию и актуальной по времени публикации обзорной работе [13] по итогам мультикритериального поиска в системах Web of Knowledge и Google Scholar систематизированы сведения всего о 28 проектах, связанных с использованием цифровых двойников в сельском хозяйстве. При этом заслуживает внимания и предпринятая автором классификация данных проектов, основанная на используемых в ЕС критериях технологической готовности (TRL, Technology Readiness Level) [3]. Данные критерии представляются достаточно релевантными и в наших условиях. Уровень технологической готовности, согласно данному документу, декомпозируется на 3 класса и 9 подклассов, представляющих собой последовательные стадии жизненного цикла исследования и разработки. Классы представлены категориями концепции («concept»), прототипа («prototype»), и внедренной технологии («deployed»). Концепция включает в себя стадии изучения базовых принципов («basic principles observed») и собственно формулировки концепта («technology concept formulated»). Категория прототипа последовательно включает в себя стадии экспериментального подтверждения концепта («experimental proof of concept»), валидацию технологии в лабораторных условиях и в релевантном окружении («technology validated in lab/in relevant environment»). В качестве отдельной стадии выделяется демонстрация технологии в релевантном окружении («technology demonstrated in relevant environment»). Категории внедрения технологии представлены демонстрацией прототипа системы в реальных условиях («system prototype demonstration in operative environment»), завершенной системой удовлетворяющей проектным критериям качества («system complete and qualified»), внедренной системой, действующей в реальных условиях («actual system proven in operational environment»). Российский национальный стандарт ГОСТ Р 58048-2017 «Трансфер технологий. Методические указания по оценке уровня зрелости технологий» в п. 5.1. «Оценка готовности технологии» фактически дублирует данные критерии [20].

Среди упомянутых выше 28 проектов насчитывается 10 находящихся на различных стадиях концептуальной проработки и 10 вышедших на уровень рабочего прототипа, 8 проектов уже находятся в стадии внедрения. Среди последних следует выделить португальский проект Open PD, представляющий собой разработку алгоритма идентификации фитопатологий и поражения растений вредителями, основанном на сборе данных через клиентское мобильное приложение, репрезентацией признаков на цифровом двойнике растения и их коллективной экспертной оценке в рамках разработанной платформы.

Чешский проект Farm Telemetry предназначен для оптимизации операционных расходов в земледелии посредством визуализации на клиентском уровне в реальном времени координат и траекторий движения сельскохозяйственной техники, оснащенной средствами телеметрии и прецизионной навигации. Среда цифрового двойника представляет собой реляционную базу исторических данных, позволяющую оценивать и моделировать экономическую эффективность техники, прежде всего в разрезе расхода горюче-смазочных материалов [18].

Другие из этих проектов, достигшие стадии внедрения, преимущественно связаны с мониторингом и моделированием состояния сельскохозяйственных животных или же моделированием фитопатологий в плодовом садоводстве.

Среди проектов прототипного уровня следует выделить описанную в работе [17] систему эмуляции применения беспилотной сельскохозяйственной техники. Средой цифрового двойника в проекте является трехмерная цифровая модель полей, сформированная посредством фотограмметрии, учитывающая рельеф местности и наличие посторонних объектов. База данных с параметрами представленных на рынке моделей существующей беспилотной сельскохозяйственной техники позволяет осуществлять ее имитационное тестирование для поддержки принятия решений о приобретении оптимального для покупателя оборудования.

В разрезе комплексного параметрального моделирования биологической среды представляет интерес проект [16], где описывается система моделирования двухуровневой аквакулической установки замкнутого цикла водоснабжения. Задачами данного цифрового двойника является what-if моделирование комплекса таких параметров, как температура, освещение, кислотно-щелочной баланс, содержание кислорода и солей в водной среде, питания культивируемых гидробионтов и набор ими массы с целью максимизации выхода конечной рыбной и растительной продукции, минимизации загрязнения воды при сохранении соответствия заданным для системы параметрам качества. Источниками данных для реляционной базы являются лабораторные данные и данные цифрового мониторинга водной среды.

Примером успешно реализованного на прототипном уровне алгоритма цифрового мониторинга растений, хотя и в плодовом садоводстве, а не в более близком нашим задачам сфере полевого земледелия, является работа [8], где представлена разработка системы цифровых двойников для каждого отдельного дерева, данные для которой поставляются вращающимися 3D-камерами, осуществляющими мониторинг состояния деревьев в разрезе их здоровья, морфологических и фенологических признаков, а также качества фруктов. В системе существует блок искусственного интеллекта на основе нейросетевых алгоритмов, который, в сочетании с экспертными оценками, позволяет осуществлять прогнозирование температурных, водных и трофических стрессов у деревьев, а также оценку потерь урожая.

Немаловажный для поддержки принятия управленческих и агрономических решений в агроценозах вопрос логистики рассмотрен в работе [7], где средой цифрового двойника является система внутрихозяйственных грузоперевозок, моделирующая существующие и проектируемые дорожные пути, что позволяет выявить наиболее оптимальные паттерны грузоперевозок и расширения дорожной сети посредством имитационных сценариев. При этом система позволяет выстраивать когнитивные модели на репрезентационном языке UML, что оптимизирует дальнейшие управленческие мероприятия по реализации принятых решений.

На концептуальном уровне также существует ряд проектов, частично или полностью релевантных к проблематике разработки цифрового двойника агроценоза. Так, в работе [11] описывается концепция цифрового двойника, интегрирующего данные от сельскохозяйственной техники, поступающие в рамках протокола обмена данными ISOBUS, лабораторных данных, экспертного анализа и подсистемы поддержки принятия решений. Концепция цифрового двойника, представленная в работе [4], основана на интеграции метеоданных, почвенных анализов и данных дистанционного зондирования, которые используются цифровым двойником для построения теплокарт и визуальных моделей, которые используются для поддержки принятия агрономических решений и автоматизированного управления системой посредством программируемых контроллеров.

В аспекте макромасштабного мониторинга агроландшафтов представляет интерес концепция разработки цифрового двойника, интегрирующего данные дистанционного зондирования земли в масштабах больших данных на основе платформы WebGIS, источником

которых являются спутниковая съемка, аэрофотосъемка, наземные сенсоры дистанционного зондирования, что имеет своей задачей поддержку принятия решений в сфере выработки государственной экономической и экологической политики в сфере сельского хозяйства, реализацию аграрных макропроектов в национальных и региональных масштабах [1].

Таким образом, общее отставание сельского хозяйства от промышленности в процессах цифровизации производства, в том числе и в частном аспекте разработки и внедрения цифровых двойников, усугубляется и почти полным, за исключением отдельных концепций, отсутствием такого рода разработок в орошаемом земледелии, что создает значительные возможности в развитии прецизионного орошения с учетом природных особенностей Волго-Донского междуречья и предопределяемой природными, институциональными и экономическими факторами необходимостью оптимизации расхода оросительной воды с одной стороны и повышения эффективности купирования водного стресса растений с другой стороны.

Однако высокая стоимость прецизионных программно-аппаратных решений в земледелии придает особую значимость инструментарию их экономической оценки, степень автоматизации которого также должна соответствовать концептуальным стандартам Индустрии 4.0. и институциональным стандартам ведомственного подпроекта МСХ РФ «Цифровое сельское хозяйство», а именно обладать достаточной для машиночитаемости степенью формализации, позволяющей подавать на входы интеллектуальной информационной системы в том числе и комплекс экономических параметров (рисунок 1).

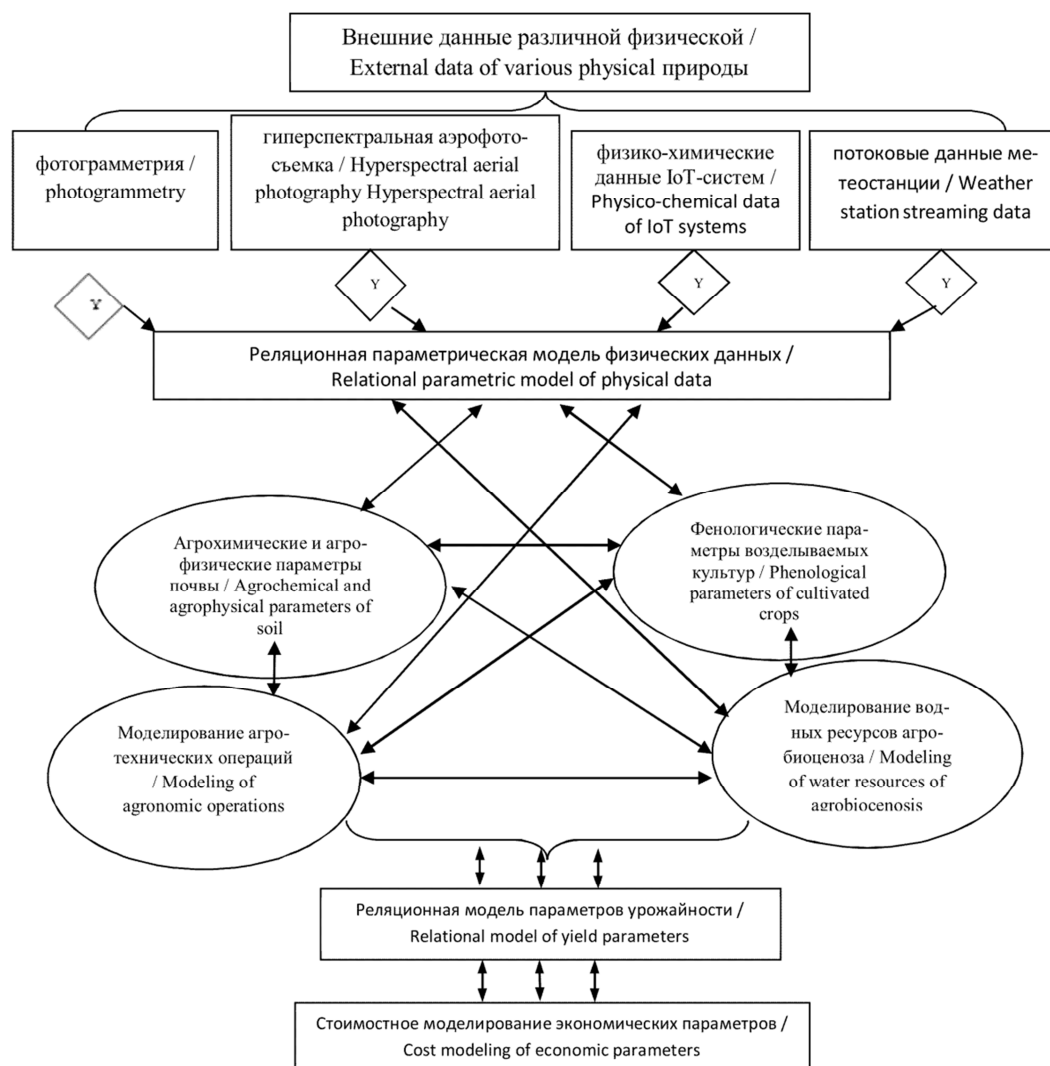


Рисунок 1 – Общая когнитивная модель цифрового двойника агроценоза
Figure 1 – General cognitive model of the digital twin of agrobiocenosis

Ядром программной архитектуры такой системы является кластер динамических объектно-ориентированных моделей, с достаточной степенью детализации отображающих параметры:

- 1) агротехнических операций;
- 2) физико-химических свойств почвы;
- 3) формализованных фенологических параметров растений;
- 4) гидроинженерным комплексом параметров оросительной системы и эвапотранспирационным комплексом параметров агроценоза.

Входные потоки данных будут сформированы:

- 1) фотопозиционированием;
- 2) мультиспектральными/гиперспектральными данными аэрофотосъемки;
- 3) физико-химическими данными наземных систем дистанционного зондирования;
- 4) метеоданными интегрированной в программно-аппаратный комплекс метеостанции.

Внешней же сферой программной архитектуры будет являться динамическая модель финансовых данных, описывающая комплекс стоимостных параметров, представленных переменными, функциями и отношениями между ними. Экономический параметральный комплекс периферии, взаимодействуя с кластером моделей в ядре системы, позволит осуществить автоматизацию экономических расчетов, создав динамически моделируемые и машиночитаемые технологические карты возделываемой культуры с высокоточной привязкой к параметрам конкретного агроценоза.

Наличие цифрового двойника с такой архитектурой позволит осуществлять постановку многообразных и многофакторных численных экспериментов, в том числе сценарное прогнозирование и стресс-тестирование бизнес-проектов в сфере земледелия, в том числе связанных с оросительной мелиорацией, а также экономическую оценку технических решений в орошении агробиоценоза, агротехнологических операций и севооборотов. Это, в свою очередь, обеспечит стейкхолдерам системы оптимум интенсификации производства с высокоточной репрезентацией баланса между потребностями растений в физиологически оптимальных условиях развития и потребностями аграриев в экономически оптимальной себестоимости продукции.

Таким образом, цифровой двойник решающий данные задачи должен представлять собой кластера объектно-ориентированных моделей агроценоза, объединенных реляционной структурой данных, интегрирующей экономические и физические параметры.

Его системная архитектура декомпозируется на следующие блоки:

1. Разработка алгоритмического ядра автоматизированной системы вычислений, формализующего физические процессы в агроценозе, что включает в себя:

- 1.1. декомпозицию агротехнических операций, в отличие от конвенциональных технологических карт представляющую собой не комплекс статичных объектов, отображающих предустановленные данные об операции в целом, а систему динамических переменных, интегрирующих параметры сопротивления почвы для конкретного агроценоза, паспортного и фактического (с поправкой на износ поршневой группы и т.п. факторы) расхода ГСМ наличествующей в хозяйстве (а не моделируемой *in abstractio*) сельскохозяйственной техники, ширины захвата агрегата и других параметров

- 1.2. репрезентацию физических и химических свойств почвы, что прежде всего включает в себя автоматизацию расчетов заданного агрохимического фона, а также ввода данных о водно-воздушном режиме почвы, ее гранулометрическом составе, кислотно-щелочном балансе, влажности, состоянии гумусовых горизонтов А-АВ.

- 1.3. репрезентацию свойств растений, что включает в себя комплекс параметров характеристик культуры и сорта, а также данные о погодных условиях, в том числе фотосинтетической активной радиации, потенциальном урожае и действительно возможном урожае.

- 1.4. гидромелиоративные параметры моделируемого агробиоценоза, что включает в себя данные о водных режимах, гидроинженерных параметрах системы, показателях эвапотранспирации.

2. Разработка реляционной модели экономических данных, во взаимодействии с блоками 1.1.-1.4. обрабатывающей заданные стоимостные параметры эксплуатации орошаемого агроценоза, что позволит выявить оптимальный и увязанный с экономическими возможностями уровень интенсификации производства. Объектами данной модели являются стоимость семян, горюче-смазочных материалов, удобрений, гербицидов, фонд оплаты труда.

Заключение. Вышеизложенное позволит осуществить разработку и валидацию объектно-ориентированной модели данных, интегрирующей данные различной физической природы и автоматизирующей параметральное моделирование агробиоценоза, что позволит качественно сократить неопределенность в экономических параметрах агроценоза в дискретном пространственном и временном измерении, а также трудозатраты для проведения расчетов, а также сформировать первичный расчетный и методологический базис для интеграции прецизионного орошения, прецизионного земледелия и программирования урожаев с дальнейшим использованием результатов исследования в киберфизических системах, в том числе с применением искусственного интеллекта. Данный базис может быть создан посредством разработки объектно-ориентированного кластера моделей и реляционной базы данных в формате псевдокода (частичной формализации) в среде MS Excel, первоначально тестируемой а имитационных и эмпирических данных с ручным вводом параметров. В качестве объектных культур для моделируемых орошаемых агробиоценозов наиболее релевантны соя, кукуруза, многолетние травы, нут. Затем представляется возможной полная формализация псевдокода с его преобразованием в машиночитаемый формат. Предполагается валидация гипотезы о возможности преобразования объектов в MS Excel в машиночитаемые формы через базу данных в формате .csv для дальнейшего оперирования с машиночитаемыми объектами в языке Python, а также и валидация гипотезы о реализуемости ввода данных для произвольного множества дата-кубов, что и представляется главной задачей полной формализации, которая, в свою очередь, обеспечит интеграцию кластера моделей со входами данных, поставляемыми прецизионной киберфизической системой.

Conclusions. The foregoing will make it possible to develop and validate an object-oriented data model that integrates data of various physical nature and automates the parametric modeling of agrobiocenosis, which will qualitatively reduce the uncertainty in the economic parameters of agroecosis in a discrete spatial and temporal dimension, as well as labor costs for calculations, as well as form a primary calculation and methodological basis for the integration of precision irrigation, precision farming and crop programming with further use of the research results in cyber-physical systems, including the use of artificial intelligence. This basis can be created by developing an object-oriented cluster of models and a relational database in the pseudocode format (partial formalization) in the MS environment Excel initially tested on simulation and empirical data with manual input of parameters. Soybeans, corn, perennial grasses, and chickpeas are the most relevant as object crops for the simulated irrigated agrobiocenoses. Then it is possible to completely formalize the pseudocode into a machine-readable format. It is supposed to validate the hypothesis about the possibility of converting objects into MS Excel to machine-readable forms via a database in .csv file for further operation with machine-readable objects in the Python language, as well as validation for the hypothesis about the feasibility of data input for an arbitrary set of data cubes, which seems to be the main task of complete formalization, which, in turn, will ensure the integration of a cluster of models with data inputs supplied by precision cyber-physical system.

Библиографический список

1. Delgado J. A., Short N. M., Roberts D. P., Vandenberg B. Big Data Analysis for Sustainable Agriculture on a Geospatial Cloud Framework. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2019. N. 3. P. 54.
2. Elijah O., Rahman T. A., Orikumhi I., Leow C. Y., Hindia M. H. An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*. 2018. N. 5 (5). Pp. 3758-3773.
3. European Commission. Technology readiness levels (TRL). Extract from Part 19 – Commission Decision C (2014) 4995. Technical report. 2014. https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/ annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf
4. Gomes Alves R., Souza G., Maia R., Lan Ho Tran A., Kamienski C., Soininen J.-P., Thomaz Aquino-Jr. P., Lima F. A digital twin for smart farming. *IEEE Global Humanitarian Technology Conference*. Seattle, 2019.
5. Grieves M., Vickers J. 2017. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*. Springer International Publishing. Cham, 2017. Pp. 85–113.
6. Janssen S. J., Porter C. H., Moore A. D., Athanasiadis I. N., Foster I., Jones J. W., Antle J. M. Towards a new generation of agricultural system data, models and knowledge products: Information and communication technology. *Agricultural Systems*. 2017. N. 155. Pp. 200-212.
7. Machl T., Donaubaue A., Kolbe T. H. Planning Agricultural Core Road Networks Based on a Digital Twin of the Cultivated Landscape. *Full Paper Journal of Digital Landscape Architecture*. 2019. P. 316–327.
8. Moghadam P., Lowe T., Edwards E. J. Digital Twin for the Future of Orchard Production Systems. *Proceedings*. 2020. V. 36 (1). N. 92.
9. Mukherjee T., DebRoy T. A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components. *Application of Materials Today*. 2019. V. 14. P. 59–65.

10. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing*. 2017. N 11. P. 939-948.
11. Paraforos D. S., Sharipov G. M., Griepentrog H. W. ISO 11783-compatible industrial sensor and control systems and related research: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N. 163. P. 104863.
12. Patricio D. I., Rieder R. Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. N 153. Pp. 69-81.
13. Pylianidis C., Osinga S., Athanasiadis I. Introducing digital twins to agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. V. 184. P. 105942.
14. Pylianidis C., Osinga S., Athanasiadis I. Introducing digital twins to agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. V. 184. 105942.
15. Qi Q., Tao F. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. *IEEE Access*. 2018. V. 6. Pp. 3585–3593.
16. Tan G., Lehmann A., Teo Y. M., Cai W. Methods and Applications for Modeling and Simulation of Complex Systems. *Communications in Computer and Information Science*. 2019. V. 1094.
17. Tsolakis N., Bechtsis D., Bochtis D. Agros: A robot operating system based emulation tool for agricultural robotics. *Agronomy*. 2019 V. 9. N. 7.
18. Verdouw C., Kruijze J. W. Digital twins in farm management: illustrations from the FIWARE accelerators SmartAgriFood and Fractals. 7th Asian-Australasian Conference on Precision Agriculture. 2017.
19. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M.-J. Big Data in Smart Farming - A review. *Agricultural Systems*. 2017. N 153. Pp. 69-80.
20. Трансфер технологий. Методические указания по оценке уровня зрелости технологий: ГОСТ Р 58058-2017. М.: Стандартинформ, 2018. 41 с.
21. Брыль С. В., Зверьков М. С. Создание цифровой модели рельефа мелиоративного объекта по данным дистанционного зондирования земли. *Системные технологии*. 2021. № 4 (41). С. 37-42.
22. Демичев В. В. Стратегия цифровизации ЕС до 2030 года: полезный опыт для сельского хозяйства России. *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2021. Т. 4. № 12 (120). С. 98-104.
23. Романцева Ю. Н., Демичев В. В. Мировые тенденции и подходы к цифровизации АПК. *Дружковский вестник*. 2021. № 5 (43). С. 168-181.
24. Тимиргалеева Р. Р., Вердыш М. В. Формирование модели цифровой среды системы управления агропромышленного комплекса. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2022. № 5. С. 54-58.

References

1. Delgado J. A., Short N. M., Roberts D. P., Vandenberg B. Big Data Analysis for Sustainable Agriculture on a Geospatial Cloud Framework. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2019. N. 3. P. 54.
2. Elijah O., Rahman T. A., Orikumhi I., Leow C. Y., Hindia M. H. An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*. 2018. N. 5 (5). Pp. 3758-3773.
3. European Commission. Technology readiness levels (TRL). Extract from Part 19 - Commission Decision C (2014) 4995. Technical report. 2014. https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/ annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf
4. Gomes Alves R., Souza G., Maia R., Lan Ho Tran A., Kamienski C., Soininen J.-P., Thomaz Aquino-Jr. P., Lima F. A digital twin for smart farming. *IEEE Global Humanitarian Technology Conference*. Seattle, 2019.
5. Grieves M., Vickers J. 2017. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*. Springer International Publishing. Cham, 2017. Pp. 85–113.
6. Janssen S. J., Porter C. H., Moore A. D., Athanasiadis I. N., Foster I., Jones J. W., Antle J. M. Towards a new generation of agricultural system data, models and knowledge products: Information and communication technology. *Agricultural Systems*. 2017. N. 155. Pp. 200-212.
7. Machi T., Donaubaue A., Kolbe T. H. Planning Agricultural Core Road Networks Based on a Digital Twin of the Cultivated Landscape. *Full Paper Journal of Digital Landscape Architecture*. 2019. P. 316–327.
8. Moghadam P., Lowe T., Edwards E. J. Digital Twin for the Future of Orchard Production Systems. *Proceedings*. 2020. V. 36 (1). N. 92.
9. Mukherjee T., DebRoy T. A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components. *Application of Materials Today*. 2019. V. 14. P. 59–65.
10. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing*. 2017. N 11. P. 939-948.
11. Paraforos D. S., Sharipov G. M., Griepentrog H. W. ISO 11783-compatible industrial sensor and control systems and related research: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N. 163. P. 104863.
12. Patricio D. I., Rieder R. Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. N 153. Pp. 69-81.
13. Pylianidis C., Osinga S., Athanasiadis I. Introducing digital twins to agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. V. 184. P. 105942.
14. Pylianidis C., Osinga S., Athanasiadis I. Introducing digital twins to agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. V. 184. 105942.
15. Qi Q., Tao F. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. *IEEE Access*. 2018. V. 6. Pp. 3585–3593.
16. Tan G., Lehmann A., Teo Y. M., Cai W. Methods and Applications for Modeling and Simulation of Complex Systems. *Communications in Computer and Information Science*. 2019. V. 1094.
17. Tsolakis N., Bechtsis D., Bochtis D. Agros: A robot operating system based emulation tool for agricultural robotics. *Agronomy*. 2019 V. 9. N. 7.

18. Verdouw C., Kruize J. W. Digital twins in farm management: illustrations from the FIWARE accelerators SmartAgriFood and Fractals. 7th Asian-Australasian Conference on Precision Agriculture. 2017.
19. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M.-J. Big Data in Smart Farming - A review. *Agricultural Systems*. 2017. N 153. Pp. 69-80.
20. Technology transfer. Guidelines for assessing the level of maturity of technologies: GOST R 58058-2017. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 41 p.
21. Bryl S. V., Zverkov M. S. Creation of a Digital Relief Model of a Reclamation Object Based on Earth Remote Sensing Data. *System technologies*. 2021. № 4 (41). Pp. 37-42.
22. Demichev V. V. EU Digitalization Strategy until 2030: Useful Experience for Agriculture in Russia. *Economics and Management: Problems, Solutions*. 2021. V. 4. № 12 (120). Pp. 98-104.
23. Romantseva Y. N., Demichev V. V. World Trends and Approaches to the Digitalization of the Agro-Industrial Complex. *Drucker's Bulletin*. 2021. № 5 (43). Pp. 168-181.
24. Timirgaleeva R. R., Verdysh M. V. Formation of a Model of the Digital Environment of the Management System of the Agro-Industrial Complex. *International Journal of Applied and Basic Research*. 2022. № 5. Pp. 54-58.

Информация об авторах

Боровой Станислав Евгеньевич, младший научный сотрудник лаборатории мониторинга агроландшафтов, «Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия» (Российская Федерация, 400002, г. Волгоград, ул. Тимирязева, д. 9), e-mail: borovoy.s.e@yandex.ru

Комарова Ольга Петровна, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории мониторинга агроландшафтов, «Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия» (Российская Федерация, 400002, г. Волгоград, ул. Тимирязева, д. 9), e-mail: komarova62@rambler.ru

Козенко Константин Юрьевич, кандидат экономических наук, старший научный сотрудник лаборатории экономических исследований, «Всероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия» (Российская Федерация, 400002, г. Волгоград, ул. Тимирязева, д. 9), e-mail: k-kozenko@rambler.ru

Author's Information

Borovoy Stanislav Evgenievich, Junior Researcher, Laboratory of Monitoring of Agrolandscapes, All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture (Russian Federation, 400002, Volgograd, Timiryazev st., 9), e-mail: borovoy.s.e@yandex.ru

Komarova Olga Petrovna, Candidate of Agricultural Sciences, Leading Researcher, Laboratory of Monitoring of Agrolandscapes, All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture (Russian Federation, 400002, Volgograd, Timiryazev st., 9), e-mail: komarova62@rambler.ru

Kozenko Konstantin Yuryevich, Candidate of Economic Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Economic Research, All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture (Russian Federation, 400002, Volgograd, Timiryazev st., 9), e-mail: k-kozenko@rambler.ru

DOI: 10.32786/2071-9485-2024-03-20

GEOINFORMATION ANALYSIS OF THE KALACH UPLAND AGRICULTURAL LANDSCAPES ON THE EXAMPLE OF THE "SOLOMKA" RESEARCH GROUND

Istomin S. A., Khnyckin A. S.

*Federal State Budget Scientific Institution "Federal Scientific Centre of Agroecology, Complex Melioration and Protective Afforestation of the Russian Academy of Sciences"
Volgograd, Russian Federation*

Corresponding author E-mail: istomin-s@vfan.ru

Received 25.01.2023

Submitted 04.04.2024

The research was carried out within the framework of state task No. FNFE-2022-0011 "Development of a new methodology for optimal management of biological resources in agrolandscapes of the arid zone of the Russian Federation using system-dynamic modeling of soil and hydrological processes, a comprehensive assessment of the climate change impact and anthropogenic loads on agrobiological potential and forest conditions"

Summary

The article presents the results of agroforestry mapping of the territory of the Solonka landfill. It was revealed that the study area is experiencing significant anthropogenic load, since the share of plowing is 70.6% of the landfill. An analysis of agricultural land was carried out by area, average steepness and exposure of slopes, and fields were identified according to the risks of degradation: deflation-hazardous is 48% of the field area, and potentially erosion-hazardous is 44%.

Abstract

Introduction. The active economic activities development related to the use of natural resources has a significant impact on nature-territorial complexes. Geoinformation analysis of the territory is one of the stages of obtaining primary information about the landscape components characteristics. Environmental protection measures are being developed and implemented on the data obtained basement. **Research object.** The "Solonka" research ground with an area of 37614.5 hectares is located in the western part of the Nekhaevsky municipal district near the Solonka village. **Materials and methods.** Within the framework of this study, the methodology is based on five stages: preliminary decryption (primary analysis of the study area); field research (building environmentally