

**О НЕКОТОРЫХ МЕТОДАХ РАСЧЁТА СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ
В СЕРВИСЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА РАСТЕНИЙ**© 2022 П.О. Скобелев^{1,2}, А.С. Табачинский^{1,2}, Е.В. Симонова³, Ю.Н. Журавель⁴, Г.Н. Мятлов¹¹ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия² Самарский федеральный исследовательский центр РАН, г. Самара, Россия³ Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
г. Самара, Россия⁴ АО «Ракетно-космический центр «Прогресс», г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 20.06.2022

В статье представлена концепция цифрового двойника растений – системы поддержки принятия агрономических решений для внедрения технологий точного земледелия. Цифровой двойник растений позволяет на основе климатических и почвенных данных с полей прогнозировать и моделировать состояние растений и выдавать рекомендации по обработке посевов. Цифровой двойник растений разработан с применением мультиагентных технологий и онтологического подхода к описанию предметной области.

Ключевые слова: цифровой двойник растений, точное земледелие, система поддержки принятия решений, мультиагентные технологии, модель роста растений

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-3-100-111

ВВЕДЕНИЕ

Данная статья описывает первую часть исследования методов, разработанных для цифрового двойника растений. Первая часть включает в себя понятие термина «цифровой двойник растений», критический обзор существующих решений в области моделирования состояния растений для целей точного земледелия, и описание предложенной модели роста и развития растений по стадиям.

Один из путей совершенствования точного земледелия, повышения урожайности сельскохозяйственных культур, сохранения

плодородия почв и устойчивого развития агропромышленного бизнеса в последнее время связывается с применением технологий цифровых двойников (ЦД) [1].

Цифровые двойники, отражающие тенденцию к конвергенции современных информационных технологий, изначально разрабатывались в промышленности для управления сложными техническими объектами (спутники, турбины, станки и др.) [2], однако в последнее время стремительно растёт число таких проектов для сельского хозяйства, от ЦД ландшафта полей до ЦД теплиц [3, 4].

Значение ЦД растений (ЦДР) для сельского хозяйства трудно переоценить, т.к. наличие компьютерной модели фенологических и других процессов позволит заранее более точно планировать стадии роста и развития растений и требуемые ресурсы, а также оценивать риски для бизнеса, предсказывать поведение растений при изменении тех или иных внешних условий, синхронизировать планы работы подразделений, сотрудников и дорогостоящей техники точного земледелия в соответствии с целью оптимизации расходов сельскохозяйственного предприятия. Спектр моделей, методов и технологий ИИ, применяемых в ЦДР для моделирования роста и развития растений, охватывает системы дифференциальных уравнений, модели и методы нейросетей и машинного обучения, использующие накопленную статистику для

Скобелев Петр Олегович, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории «Цифровые двойники растений» СамНЦ РАН, заведующий кафедрой «Электронные системы и информационная безопасность» СамГТУ. E-mail: petr.skobelev@gmail.com

Табачинский Алексей Сергеевич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией «Цифровые двойники растений» СамНЦ РАН, доцент и научный сотрудник кафедры «Теоретическая и общая электротехника» СамГТУ. E-mail: tabachinski.as@samgtu.ru

Симонова Елена Витальевна, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий Самарского университета. E-mail: simonova@smartsolutions-123.ru

Журавель Юлия Николаевна, ведущий специалист АО «РКЦ «Прогресс». E-mail: ntsomz_5@mail.ru

Мятлов Геннадий Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Электрический привод и автоматика» СамГТУ. E-mail: miatov@mail.ru

прогнозирования, методы кластеризации, методы сбора, хранения и обработки больших данных, Интернет вещей [5-7].

К сожалению, традиционные математические подходы дают слишком общее решение и не рассматривают индивидуальные особенности культур, погоды и почвы полей, а машинное обучение не отражает специфику внутренних причинно-следственных связей в развитии растений и не учитывает климатические изменения, которые часто обесценивают многолетние накопленные данные о погоде. Поэтому актуальным является поиск новых подходов, которые бы позволяли использовать и интегрировать как доступные модели и методы численного моделирования роста и развития растений, так и разнообразные экспертные знания агрономов, обобщающие их многолетний опыт работы для принятия решений «здесь и сейчас» в реальном времени.

В этой связи в настоящем исследовании предлагается разрабатывать ЦДР для точного земледелия, создавая модель растения как сложную адаптивную систему на основе формализации знаний предметной области, поведение которой определяется взаимодействием ее «целостности» и относительно автономных «элементов», способных воспринимать состояние внешней среды, принимать самостоятельные решения и согласовывать эти решения между собой с учетом имеющихся предпочтений и ограничений.

На первом этапе разработки ЦДР в качестве базовых элементов принятия решений предполагается рассматривать стадии роста и развития растений, взаимодействие которых и будет формировать модель поведения растения как «целого», которое, в свою очередь, будет оказывать воздействие на поведение этих элементов.

Для реализации ЦДР предлагается использовать онтологии и мультиагентные технологии, позволяющие построить ЦДР как интеллектуальную систему адаптивного планирования фаз (стадий) роста и развития растений.

Данная статья имеет следующую структуру. Во введении обосновывается актуальность разработки ЦДР. В первом разделе приводится постановка задачи разработки моделей и методов расчёта состояния посевов в сервисе ЦДР. Во втором разделе выполнен краткий обзор существующих подходов к созданию ЦД в области сельского хозяйства. В третьем разделе описывается математическая постановка задачи и приводится метод коллективного согласованного принятия решений при расчете стадий роста и развития растений и прогноза урожайности в условиях действия ограничивающих ресурсных факторов внешней среды. В выводах обсуждаются результаты разработки и проведенных исследований, а также намечаются планы дальнейших разработок.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ РАСЧЁТА СОСТОЯНИЯ ПОСЕВОВ В СЕРВИСЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА РАСТЕНИЙ

Цифровые двойники – одно из самых стремительно развивающихся направлений в области Computer Science, основанное на конвергенции передовых информационных технологий, включая кибер-физические системы, компьютерное моделирование, Интернет вещей и ряд других.

Несмотря на то, что еще продолжают дискуссии относительно возможных определений ЦД и их классификации, на практике выделяются три основных свойства ЦД:

- быть представителем реального объекта, отражающим данные о его состоянии в текущий момент времени;
- использовать модель объекта, позволяющую планировать и прогнозировать будущие состояния реального объекта на основе данных, поступающих от объекта в реальном времени;
- функционировать автономно от реального объекта и использоваться для выработки управляющих воздействий на реальный объект.

Для развития точного земледелия по месту и времени, необходимо разработать ЦДР, содержащий модель растения, которая на каждой фенологической стадии самосинхронизируется с ростом реальных растений по выбранному набору параметров с учётом действия непрерывно изменяющихся факторов внешней среды, как считываемых с сервера погоды, так и вручную вносимых агрономами, включая параметры самих растений, почвы и другие факторы. При этом онтологии должны обеспечить возможность расширения количества рассматриваемых факторов, а мультиагентные технологии – обеспечить адаптивность перестроения планов роста и развития растений и прогноза урожайности. Предполагается, что чем чаще и полнее будут учитываться изменения факторов, характеризующие стадии роста и развития растений, тем меньше будет погрешность в расхождении между реальными и виртуальными посевами даже при линейности взаимного влияния факторов, принятой для упрощения. Обладая всегда актуальным планом развития растения, адаптивно корректируемым по событиям внешней среды, ЦДР может быть использован и для разработки рекомендаций по проведению агротехнологических мероприятий, включая даты их проведения, объемы и рецептуры применения препаратов.

Основные принципы предлагаемого подхода к созданию ЦДР, разработанные модели формализации предметных знаний о культурах растений и методы адаптивного планирования фенофаз (стадий) роста и развития растений

представлены в более ранних публикациях [8-11].

Целью данной работы является дальнейшее развитие мультиагентных моделей и методов в части коллективного принятия согласованных решений программными агентами стадий роста и развития растений с учетом ресурсных ограничений. При этом прогнозируемая урожайность и сроки наступления и завершения фаз предлагается определять на основе выделения лимитирующего фактора, ограничивающего по ресурсам рост и развитие растений на каждой стадии.

Для создания ЦДР предлагается использовать следующие два принципа:

1. Модель роста и развития растений рассматривается как самоорганизующаяся система, в которой план роста и развития растения на каждой стадии строится и адаптивно перестраивается в ходе взаимодействия и согласованного принятия решений растением «как целым» и его относительно автономными «частями» под действием непрерывно изменяющихся факторов внешней среды, что может быть реализовано на основе мультиагентных технологий [12].

2. Создаваемая модель и метод планирования и моделирования роста и развития электронного (виртуального) посева растений должны быть открыты к пополнению новыми знаниями от агрономов, физиологов растений, почвоведов и других специалистов и должны позволять им интегрировать эти знания в ходе своей работы, что может быть реализовано путем создания онтологий и баз знаний о культурах растений [13, 14].

Таким образом, ЦДР должен быть построен как адаптивная интеллектуальная система, учитывающая воздействие непрерывно изменяющихся факторов внешней среды, состав которых также может расширяться пользователями системы.

2 КРАТКИЙ ОБЗОР ПОДХОДОВ К РАЗРАБОТКЕ ЦД РАСТЕНИЙ

В настоящее время разрабатывается и апробируется ряд программно-технических комплексов, реализующих отдельные аспекты концепции ЦД, которые предназначены для планирования и моделирования технологических операций возделывания различных культур с учетом климатических условий и других внешних факторов. Проанализируем функциональность ряда таких систем.

В патенте [15] рассматривается система поддержки принятия решений для управления сельскохозяйственным предприятием на основе опыта и интересов фермеров. В системе в реальном масштабе времени реализуется сбор данных от полевых датчиков и внешних сервисов, например, службы прогнозов погоды, на

их основе генерируется множество сценариев проведения сельскохозяйственных работ для модели выбранной культуры с учетом предварительно определенного уровня компетенций пользователя.

В статье [16] описывается технология «Digital Twin Solutions for Smart Farming», разрабатываемая в Тайваньском исследовательском институте сельского хозяйства при государственном Совете по сельскому хозяйству в рамках исследовательского проекта Smart Agriculture R&D program.

Используя технологию «Digital Twin Solutions for Smart Farming», фермеры могут не только изменять настройки оборудования и агротехнологические процессы, основываясь на своем опыте и наблюдениях на местах, но и делать прогнозы путем моделирования, прежде чем внести какие-либо изменения, чтобы выбрать лучшее решение. В этой технологии реализованы модели нейронных сетей для обработки больших сельскохозяйственных данных.

В статье [17] предлагается комплексная система точного земледелия, которая включает цифровые платформы, программы искусственного интеллекта, датчики с обратной связью, инструментарий для приготовления и точечного внесения сбалансированных удобрений и средств защиты растений в заданное время, в указанном месте и в необходимых количествах. Благодаря учету в режиме реального времени индивидуальных почвенно-климатических условий и потребностей растений, аграрии получают возможность адаптировать процесс роста растений к текущим условиям, программировать параметры урожая за счет рационального использования ресурсов, обеспечивать фитосанитарную защиту растений и избежать загрязнения почвы.

В Business Unit Greenhouse Horticulture at Wageningen University & Research, Netherlands разрабатывается проект «Виртуальные томаты» на основе цифрового двойника (The Digital Twin project Virtual Tomato Crops - VTC), включающий модель, которая связывает климатические показатели с ростом и развитием сельскохозяйственных культур в теплице [18].

Основу VTC составляет функционально-структурная модель растения, которая имитирует отдельные растения и их производственный процесс (например, фотосинтез в листьях) в зависимости от использования общих ресурсов, например, освещения, полива, питательных веществ, CO₂, электроэнергии и воды. Основной фокус исследований будет сосредоточен на развитии методов глубокого обучения для получения оценок морфологических, отражательных и физиологических характеристик растений, таких как эффективность фотосинтеза, транспирация, пигментация. Выходные данные мо-

дели, обновляемые по мере роста и развития урожая, будут использоваться для автоматического управления настройками микроклимата в теплице.

В патенте [19] рассматривается метод получения оценок параметров растения в процессе роста с использованием алгоритмов машинного обучения. Для обучения используются наборы данных, описывающих окружающую среду (например, данные об интенсивности освещения и влажности почвы), а также само растение в состоянии стресса и при отсутствии стресса. В системе может применяться набор обученных моделей для оценивания различных параметров растения: первая модель предназначена для оценки недостатка питательных веществ, вторая модель – для оценки зараженности растения насекомыми, третья модель – для оценки инфицирования растения патогеном (например, грибом). Модель позволяет пользователю обнаруживать растения в состоянии стресса для принятия мер.

Анализ имеющихся разработок показал, что ЦД, базирующихся на компьютерных моделях растений, на текущий момент создано относительно мало, что обусловлено экстремально высокой сложностью задачи моделирования физиологии живых систем, не позволяющей пока построить полностью адекватные модели и методы расчета поведения растений при разнообразных факторах внешней среды.

Одним из первых примеров динамической модели продукционного процесса сельскохозяйственных растений можно считать разработанную в лаборатории моделирования агроэкосистем агрофизического научно-исследовательского института (ФГБНУ АФИ) модель AgroTool, описывающую основные процессы в системе «почва-растение-атмосфера» от момента сева до полного созревания [20]. Модель может применяться для прогноза урожайности, оценки темпов фенологического развития, анализа и выбора наилучших агротехнических решений.

В качестве входных данных используются набор суточных метеопараметров, дата сева, параметры почвы (влагозапас в метровом слое и количество минерального азота до сева или в день сева), сведения о применяемой агротехнике.

Базовый алгоритм модели на основе системы конечно-разностных уравнений позволяет рекурсивно вычислять вектор значений всех определяющих характеристик агроэкосистемы на следующем шаге расчета, если известно состояние этого вектора на предыдущем шаге.

В качестве даты начала прогнозирования величины урожая для зерновых культур принимается дата цветения. Предикторами функции прогноза урожая являются показатели внешних

воздействий и параметры растений: отношение суммы осадков к сумме транспирации посева, суммарная вегетативная биомасса посева, биомасса колоса.

Прогнозируемая величина урожая рассчитывается с помощью уравнения регрессии и выдается в виде минимальной и максимальной границ. Отмечается, что для первого запуска модели на счёт требуется информация за прошедшие 5-6 лет вегетации.

Из проведенного обзора можно сделать вывод, что в настоящее время имеются следующие основные подходы к созданию ЦДР:

- аналитическое описание динамической модели ЦДР на основе алгебраических и дифференциальных уравнений;
- экспертный подход, согласно которому модель ЦД формируется на основе эмпирических экспертных знаний агрономов;
- статистический подход на основе метода машинного обучения и нейронных сетей, технологий BigData и DataMining.

Эти подходы обладают рядом ограничений:

- использование систем уравнений дает слишком общее решение, не учитывающее индивидуальные особенности конкретного сорта культуры и внешней среды посевов растений;
- экспертные знания агрономов имеют индуктивную природу, часто не полны, разрознены и фрагментированы, применимы лишь к конкретным ситуациям;
- машинное обучение не позволяет объяснить и смоделировать внутренние процессы в растениях и не учитывает глобальные изменения климата, которые не позволяют использовать многолетние накопленные данные.

Выявленные ограничения делают актуальной задачу поиска новых гибридных подходов и разработки новых моделей, методов и средств планирования и моделирования развития растений, а также прогнозирования урожая с учетом растущей неопределенности изменений в среде выращивания и расширяющегося числа влияющих факторов.

3 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА СТАДИЙ РОСТА И РАЗВИТИЯ РАСТЕНИЙ: ЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ РОСТА И РАЗВИТИЯ РАСТЕНИЯ ПО СТАДИЯМ

Рассмотрим более подробно математические модели ЦДР, необходимые для планирования и моделирования развития растения по стадиям в условиях действия множества факторов и позволяющие сформировать базу знаний для поддержки работы агентов с целью достижения конкурентного равновесия между требуемыми и доступными ресурсами на каждой стадии.

Каждый сорт растения в разработанном подходе описывается в виде множества взаимосвязанных стадий роста и развития, каждая из которых характеризуется своими входными и выходными данными:

Сорт растения = {Стадия 1, Стадия 2, ..., Стадия n}, где каждая Стадия i, в свою очередь, имеет входные {Xi} и выходные {Yi} параметры, связанные соотношением Fi:

$$Y_i = F_i(X_i).$$

Взаимосвязь стадий определяется тем, что часть результатов Yi становится входными данными следующей стадии Xi+1.

В ходе проведенного анализа статистических данных, предоставленных Самарским НИИСХ им. Тулайкова, было выделено начальное множество Xi основных видов входных параметров внешней среды для возделывания пшеницы:

- температура воздуха,
 - относительная влажность воздуха,
 - влажность почвы,
 - гидротермический коэффициент;
- базовый состав почвы.

При накоплении определённой суммы средних суточных температур воздуха, превышающих установленный биологический минимум (суммы активных температур), происходит переход развития растения на следующую стадию [21, 22].

Сумма активных температур и гидротермический коэффициент по Селянинову [23], рассчитываемый на основе количества осадков и температуры воздуха, и характеризующий уровень влагообеспеченности поля, формируют основную номинальную траекторию развития растения. Под «номинальной траекторией» будем понимать усредненную за пять лет траекторию роста и развития растений при идеальных условиях внешней среды.

Длительность каждой стадии роста и развития растения определяется исходя из количества дней, за которые сумма активных температур (превышающих 10°C), достигнет порогового значения, определённого для перехода на стадию i:

$$\sum_{j=1}^{dmin_i} t_j \geq T_i; t_j \geq 10 \text{ }^\circ\text{C}, i = 1..10,$$

где i – номер стадии; dmin_i – количество дней для

достижения порогового значения на стадии i; j – номер дня в стадии; t_j – средняя суточная температура в день j; T_i – пороговая сумма средних суточных температур для стадии i.

Учитывая, что на длительность стадий оказывают влияние и другие из вышеперечисленных входных параметров, правило формирования функциональной зависимости Fi разработано на основе следующих рассуждений.

В своем развитии растение проходит сильно различающиеся стадии, где изменяется сама его структура и физико-химическая модель процессов: семя становится ростком, который развивается на основе запаса питательных веществ, потом начинает развиваться корневая система, которая работает как «насос» для минеральных веществ и влаги, далее подключается фотосинтез, дающий энергию для строительства растения. Исходя из этого, можно упрощенно предположить, что растение – это машина состояний и переходов по некоторому графу, а продукционный процесс растения от высадки семян до сбора урожая происходит с учётом удовлетворённости значением входного параметра, которая аппроксимируется с помощью кусочно-линейной функции, нормированной к отрезку [0,1].

Пример такой функции для одной из стадий по одному из входных параметров приведён на рисунке 1.

В данном случае влияние функции удовлетворённости каждым входным параметром на выходные параметры для каждой стадии можно представить следующим образом:

$$y_{i,n} = \begin{cases} Min_{i,n}, x_{i,n} \in (-\infty; x_{1,i,n}) \\ \frac{1 - Min_{i,n}}{x_{2,i,n} - x_{1,i,n}} x_{i,n} + \frac{Min_{i,n} x_{2,i,n} - x_{1,i,n}}{x_{2,i,n} - x_{1,i,n}}, x_{i,n} \in [x_{1,i,n}; x_{2,i,n}] \\ 1, x_{i,n} \in [x_{2,i,n}; x_{3,i,n}] \\ \frac{Max_{i,n} - 1}{x_{4,i,n} - x_{3,i,n}} x_{i,n} + \frac{x_{4,i,n} - Max_{i,n} x_{3,i,n}}{x_{4,i,n} - x_{3,i,n}}, x_{i,n} \in (x_{3,i,n}; x_{4,i,n}] \\ Max_{i,n}, x_{i,n} \in (x_{4,i,n}; +\infty), \end{cases}$$

где i – номер стадии, n – параметр внешней среды, Min_{i,n} и Max_{i,n} определяются экспертными

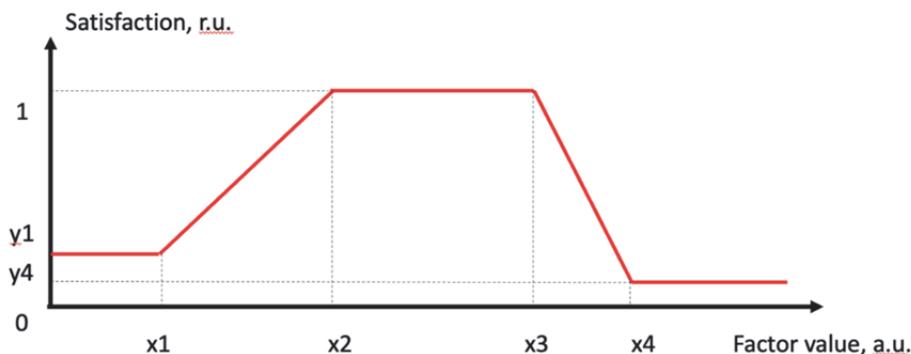


Рисунок 1 – Функция удовлетворённости входным параметром для одной из стадий

ми правилами на основе знаний агрономов для каждого из параметров каждой стадии.

Предлагаемый к рассмотрению метод формирования функциональной зависимости F базируется на гипотезе, которая состоит в том, что существуют базовые оптимальные границы x_2 и x_3 и критические границы x_1 и x_4 изменения выбранного параметра внешней среды, заданные на основе экспертной оценки агрономов. Если соблюдаются оптимальные границы, то растение развивается в полном соответствии с заданной номинальной траекторией роста, и его урожайность будет в точности соответствовать заданному биологическому потенциалу. Если же входной параметр выходит за границы диапазона оптимальных значений $[x_2, x_3]$, но еще пока остается в диапазоне $[x_1, x_4]$, действует гипотеза линейности изменения выходных параметров в этом диапазоне. Любое отклонение входного параметра внешней среды от оптимального в пределах критических значений будет вызывать линейное (пропорциональное) изменение выходных параметров урожайности и сроков стадий растений в ту или иную сторону. Эта гипотеза линейности изменений значений параметра в определенном диапазоне («коридоре» или «трубке») позволяет адаптивно, по мере поступления данных прогноза погоды, пересчитывать и корректировать даты начала и завершения стадий и их итоговую длительность [10]. В частности, если температура воздуха выше или ниже идеальной, то пропорционально изменится срок длительности стадии (при увеличении температуры длительность уменьшается).

Если же значения параметра выходят за диапазон $[x_1, x_4]$, то вместо линейной модели применяются экспертные правила $Min_{i,n}$ и $Max_{i,n}$ для связи и расчета «выход-вход», индивидуально задаваемые агрономом в каждом случае для каждой стадии.

Модель учёта «трубки» одного из параметров внешней среды представлена графически на рисунке 2.

На рисунке 2 красной пунктирной линией условно показана идеальная (номинальная) траектория значений внешнего параметра, синей пунктирной линией – верхняя и нижняя границы оптимальных значений. Сплошные синие линии указывают границы критической зоны, при выходе из которой высока вероятность гибели растения. Черной линией показан возможный ход фактического изменения параметра, видно, что он находится в пределах критических границ, что соответствует нормальному развитию растения и даёт возможность получения урожая.

Для каждого из входных параметров, определяющих рост и развитие растения, например, для уровня солнечной радиации, состава макроэлементов в почве и т.д., могут быть заданы свои границы оптимальных и критических значений в течение срока жизни растения, следовательно, влияние каждого из входных параметров описывается соответствующей моделью «трубки».

В таблице 1 приведены примеры статистических данных Самарского НИИСХ им. Тулайкова для формирования «трубок» параметров модели ЦДР по трем наиболее важным, лимитирующим входным параметрам внешней среды (ресурсам) в Среднем Поволжье: температура воздуха, относительная влажность воздуха и запасы продуктивной влаги.

В таблице 2 приведены фактические значения параметров внешней среды для посевов озимой пшеницы в 2019-2020 гг. в Среднем Поволжье.

Согласно таблице 2 следует учитывать:

- в 2019 г. стадии C_0 «посев семян» и C_1 «рост проростка» приходились на сентябрь месяц (начало стадии C_0 – 02.09.2019, C_1 – 09.09.2019), а стадия C_2 «кущение» – на октябрь месяц;

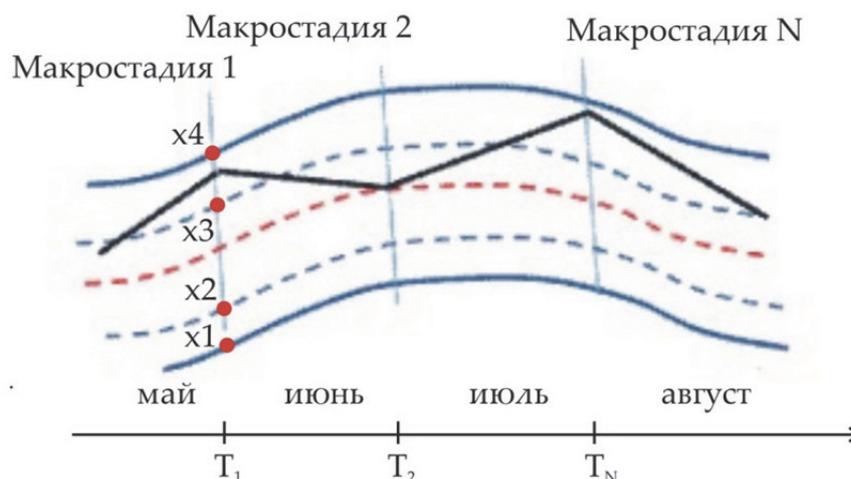


Рисунок 2 – Модель учёта «трубки» входного параметра

Таблица 1 – Параметры модели ЦДР для озимой пшеницы в Среднем Поволжье

№	Входной параметр внешней среды (ресурс)	Границы изменения выбранного параметра	Стадии									
			C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
1	Температура воздуха, °С	Max _{крит}	30	30	32	32	30	30	30	32	35	45
		Max _{оптим}	18	15	12	16	18	19	20	22	24	25
		Min _{оптим}	14	12	10	12	13	15	16	17	18	20
		Min _{крит}	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
2	Относительная влажность воздуха, %	Max _{крит}	100	100	100	90	90	90	85	85	80	80
		Max _{оптим}	75	75	70	70	70	65	60	60	55	50
		Min _{оптим}	65	65	60	60	60	55	50	50	45	40
		Min _{крит}	15	15	15	15	20	20	25	15	15	0
3	Запасы продуктивной влаги в слое 0-100 см	Max _{крит}	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
		Max _{оптим}	140	140	180	170	160	160	160	140	100	80
		Min _{оптим}	100	120	120	120	110	110	100	90	70	30
		Min _{крит}	30	30	30	30	30	20	20	20	10	10

Таблица 2 – Фактические значения параметров внешней среды для посевов озимой пшеницы в 2019-2020 гг.

Входной параметр внешней среды (средний*)		Месяцы/стадии											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
					C ₂ , C ₃	C ₄ , C ₅	C ₆ , C ₇	C ₈	C ₉	C ₀ , C ₁	C ₂		
Температура воздуха, °С	2019									13/8	9	-	-
	2020	-	-	-	7/14	14/17	18/18	25	23				
Относительная влажность воздуха, %	2019									69/70	83	-	-
	2020	-	-	-	59/56	56/77	77/63	55	55				
Запасы продуктивной влаги в слое 0-100 см	2019									130/133	147	-	-
	2020	-	-	-	179/160	91/80	70/61	н/д	н/д				

Примечание: * - средняя величина параметра за время протекания стадии,
н/д – отсутствуют данные измерений

- в 2020 г. стадия C₂ «весенние кушение» завершилась в апреле, стадии C₃ «трубкование» и C₄ «стеблевание» – в мае, стадии C₅ «колошение» и C₆ «цветение» – в июне, стадии C₇ «молочная спелость» и C₈ «восковая спелость» – в июле, а C₉ «полная спелость» – в августе. Поэтому в таблице 2 в некоторых графах приведено сразу два значения параметра.

На основе данных таблиц 1 и 2 на рисунках 3-5 приведены фактические значения входных

параметров внешней среды, сформированы «трубки» для каждого из этих параметров путем задания оптимального и критического диапазонов изменения выбранных входных параметров, влияющих на выходные параметры каждой стадии роста и развития растения.

Как видно из графиков, приведенных на рисунках 3-5, все исследуемые параметры внешней среды не выходят за пределы критических

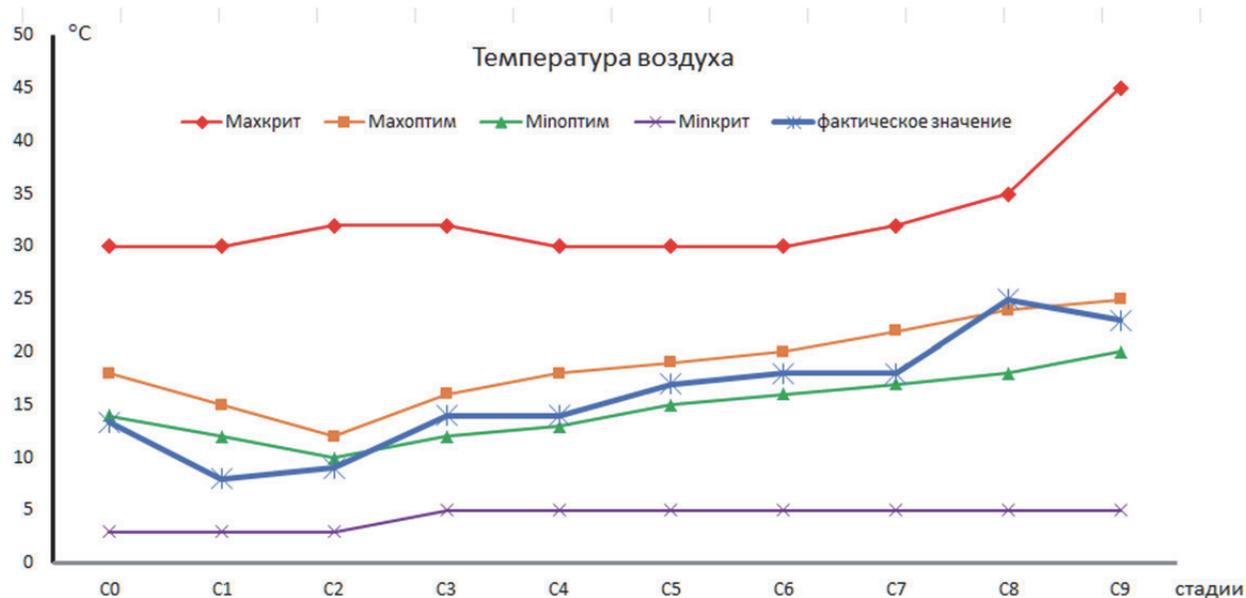


Рисунок 3 - Фактическое значение и параметры «трубки» температуры воздуха

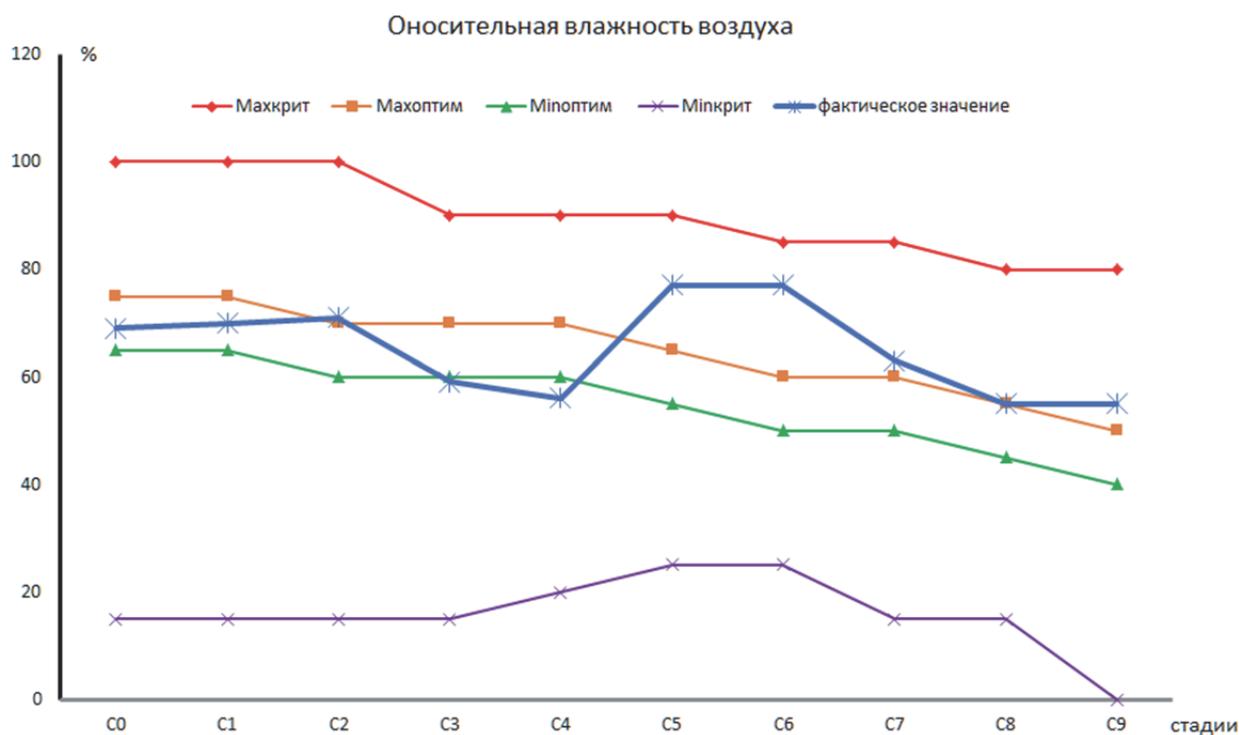


Рисунок 4 - Фактическое значение и параметры «трубки» относительной влажности воздуха

границ, и можно считать, что растение развивалось по допустимой траектории.

Рассмотрим работу МАС планирования развития и роста растения на основе данных, приведенных в таблицах 1 и 2.

Как указано выше, МАС создается по иерархическому принципу, где агентом верхнего уровня является агент растения, а агенты стадий и ресурсов, отвечающие непосредственно за процесс регулирования роста растения, находятся на нижнем уровне. Учитывая, что урожай

зависит от последовательного роста посевов на каждом этапе, первоначально создаются агенты стадии роста растения (C_0 - C_9) и агенты ресурса (P_1 - P_3). В работу последовательно вступают агенты от стадии C_0 и далее до C_9 . Агенты ресурсов соответствуют входным параметрам внешней среды, приведенным в таблице 2.

Рассмотрим фрагмент алгоритма переговоров агентов стадий C_0 и C_1 и агентов ресурсов P_1 «температура воздуха» и P_2 «относительная влажность воздуха» с момента посева в 2019 г.:

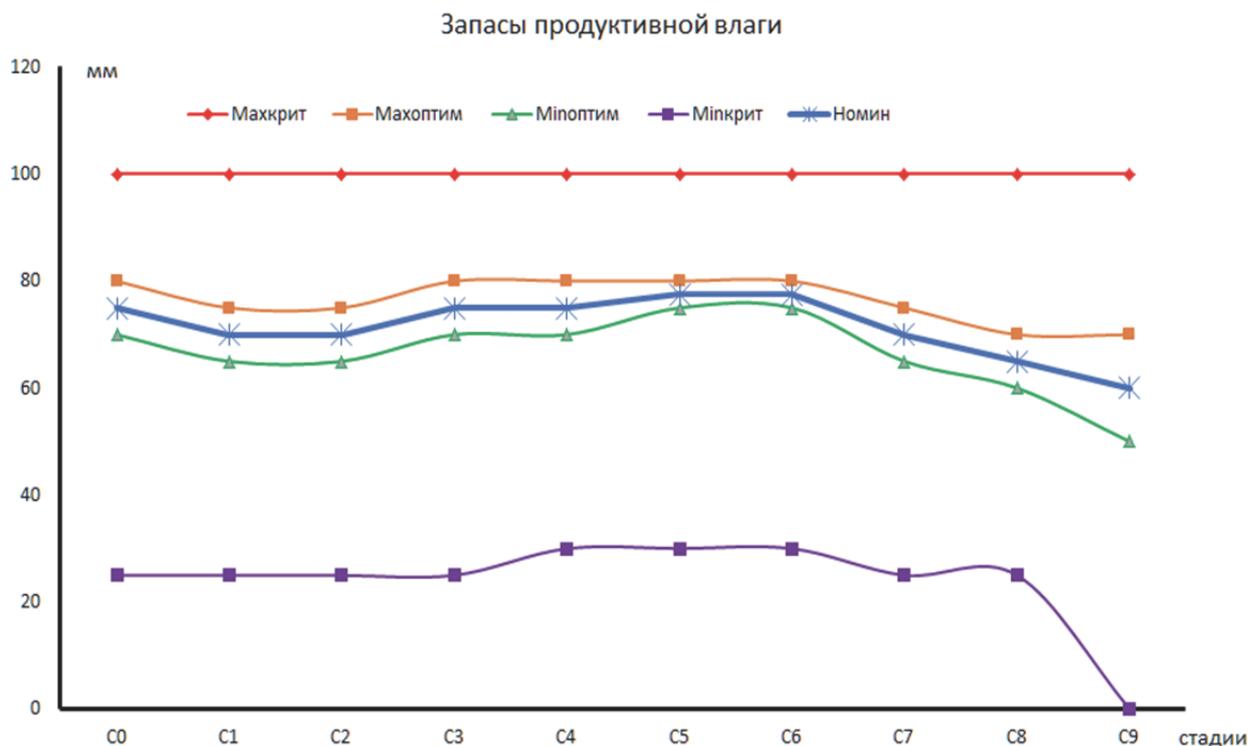


Рисунок 5 - Фактическое значение и параметры «трубки» запасов продуктивной влаги в слое 0-100 см

1. Агент стадии C_0 считывает из базы знаний условия своего развития, включая сформированные «трубки» оптимального и критического диапазонов изменения температуры воздуха и относительной влажности воздуха, затем активирует агента системы с целью проверки наличия ресурсов P_1 и P_2 для дальнейшего роста. Согласно данным таблицы 1, агент стадии C_0 формирует следующие условия:

- для температуры воздуха: $Max_{крит} = 30^{\circ}C$, $Max_{оптим} = 18^{\circ}C$, $Min_{оптим} = 14^{\circ}C$, $Min_{крит} = 3^{\circ}C$;
- для относительной влажности воздуха: $Max_{крит} = 100\%$, $Max_{оптим} = 75\%$, $Min_{оптим} = 65\%$, $Min_{крит} = 15\%$.

2. Агент системы опрашивает метеосервисы с целью получения значений температуры и относительной влажности воздуха на момент начала стадии «посев семян». В рассматриваемом примере эти значения формируются на основе полученных фактических данных в 2019 г.

3. Агент системы сообщает агентам ресурсов P_1 и P_2 о значениях выбранного ресурса, согласно данным таблицы 2, $P_1 = 13^{\circ}C$ и $P_2 = 69\%$.

4. Агент стадии C_0 вступает в переговоры с агентами ресурсов P_1 и P_2 , получает от них текущие значения ресурсов, сравнивает значения доступных и требуемых ресурсов и фиксирует, что температура на $1^{\circ}C$ ниже минимального оптимального значения, относительная влажность в пределах оптимальных значений.

5. Агент стадии C_0 принимает решение о незначительном увеличении длительности стадии C_0 .

6. Агент стадии C_0 сообщает агенту стадии C_1 и агенту растения скорректированную дату своего завершения и заканчивает работу.

Агент растения вступает в переговоры с агентом стадии C_1 с целью построения прогноза дальнейшего развития растения. В рассматриваемом примере они договариваются, что в связи с малым отставанием развития на стадии C_0 при наличии требуемых ресурсов на стадии C_1 возможно возвращение к номинальной траектории роста и развития с сохранением номинальной урожайности. Для получения номинальной урожайности важным является выдача рекомендаций пользователю ЦДР. На рисунке 6 указано оптимальное содержание азота на каждой стадии, а также рекомендуемые сроки внесения подкормки. Однако лимитирующим фактором при внесении удобрений является наличие достаточного количества влаги в почве. На примере стадии 2 весеннего кушения показаны дни, в которые шли дожди, внесение подкормки должно быть привязано к этим датам.

Таким образом, по мере поступления данных прогноза погоды пересчитывается срок окончания и начала той или иной стадии и прогноз урожайности в зависимости от параметров «трубок» внешних параметров. По результатам работы МАС на стадии C_9 «полная спелость» формируется окончательный выходной параметр урожайности посева по результатам моделирования всех стадий роста растения.

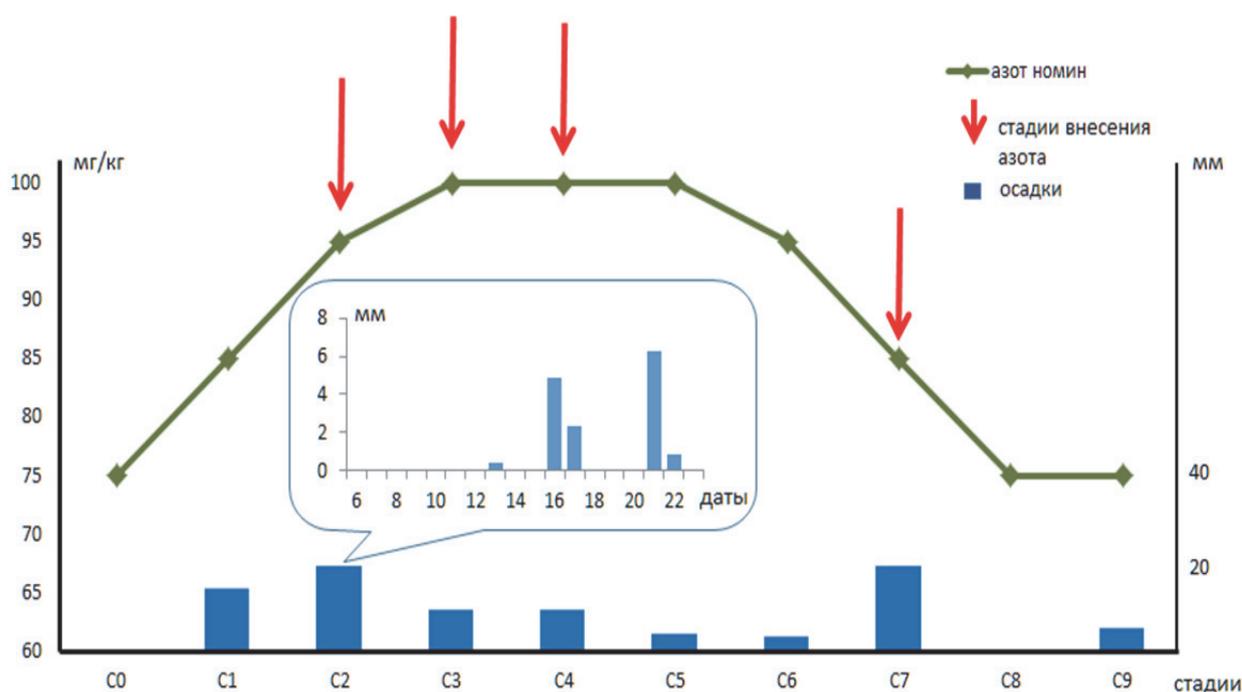


Рисунок 6 – Набор исходных данных для выдачи рекомендаций о внесении подкормки

ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ЧАСТИ СТАТЬИ

Данная статья включена в цикл работ, отражающих ход исследований и разработки цифровых двойников растений, и описывает некоторые из разработанных методов расчета состояния растений для цифровых двойников.

Идея представить модель растения в виде автономного ЦДР, принимающего решения по своему росту и развитию в зависимости от изменяющихся параметров внешней среды и расширяемой формализованными знаниями предметной области для их интеграции, на первый взгляд, может показаться парадоксальной.

Однако, результаты недавнего исследования в одном из Европейских проектов показали, что растения воспринимают окружающую среду, принимают решения и взаимодействуют с себе подобными в случае появления вредных насекомых для предупреждения их об опасности так, что соседние растения на поле успевают изменить состав своих внутренних соков и блокировать пищеварение этих насекомых [24].

Разработанный прототип автономного ЦДР позволяет планировать рост и развитие растений с учетом изменяющихся в реальном времени факторов окружающей среды и моделировать поведение растения в ответ на различные непредвиденные события, такие как жара или холод, обильные осадки или засуха и некоторые другие. В ходе работы ЦДР синхронизируется с реальными посевами на основе данных агрономов, что делает прогноз более индивидуальным и реалистичным.

Целью предложенного в статье подхода по созданию ЦДР в виде открытой самоорганизующейся системы, работающей на основе базы знаний предметной области, является не только расширение возможностей системы за счет новых сервисов, но и предоставление агрономам и другим специалистам сельского хозяйства средств систематизации и формализации новых предметных знаний о развитии растений, а также использования этих знаний для построения более адекватных планов и прогнозов урожайности посевов.

В качестве дальнейших шагов предлагается расширение набора входных и выходных параметров посевов растений, а также изучение возможностей моделирования физиологии растений на каждой стадии на уровне основных подсистем растения.

Получаемые данные предоставляют ценную информацию для последующей обработки с помощью технологий кластеризации и машинного обучения, а также могут использоваться для калибровки коэффициентов параметров трубок растений.

В дальнейшем, контур обратной связи может быть дополнен за счет получения с различных сенсоров данных по качественному и количественному составу почвы и наличию влаги на различных глубинах, а также по наблюдаемым изменениям в спектральном составе растений на основе гиперспектральных снимков и т.д.

Таким образом, предлагаемая модель растения открыта для развития, расширения и адаптации к условиям каждого хозяйства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полевая модель: как цифровой двойник повысит урожайность. / [Электронный ресурс] - <https://sk.ru/news/polevaya-model-kak-cifrovoy-dvoynik-povyisit-urozhaynost/> – 2019 (дата обращения 14.05.2022)
2. *Barricelli, B.R. A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications / B.R. Barricelli, E. Casiraghi, D. Fogli // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 167653-167671.*
3. *Moshrefzadeh, M., Machl, T., Gackstetter, D., Donaubauer, A. Towards a Distributed Digital Twin of the Agricultural Landscape. Journal of Digital Landscape Architecture 2020, 5, pp. 173-186.*
4. *C. Verdouw, B. Tekinerdogana, A. Beulensa, S. Wolfert. Digital twins in smart farming // Agricultural Systems, 2021, 189, 103046. - URL: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103046> (дата обращения 17.12.2021).*
5. *Janssen, S., Porter, C., Moore, H., et al. Towards a new generation of agricultural system data, models and knowledge products: Information and communication technology. Agric. Syst. 2017, 155, pp. 200–212.*
6. *Pukalchik, M., Shadrin, D., Kartutsa, A., et al. Machine learning methods for estimation the indicators of phosphogypsum influence in soil // Journal of Soils and Sediments 2019, 19(5), pp. 2265-2276.*
7. *Bu, F., Wang, X. A smart agriculture IoT system based on deep reinforcement learning // Future Generation Computer Systems 2019, 99, pp. 500 – 507.*
8. *Skobelev, P., Mayorov, I., Simonova, E., Goryanin, O., Zhilyaev, A., Tabachinskiy, A., Yalovenko, V. Development of digital twin of plant for adaptive calculation of development stage duration and forecasting crop yield in a cyber-physical system for managing precision farming. In Cyber-Physical Systems: Digital Technologies and Applications; Kravets, A.G., et al, Eds.; Springer Nature: Switzerland AG, 2021; Studies in Systems, Decision and Control, vol. 350, 2021; pp. 83-96.*
9. *Skobelev, P., Laryukhin, V., Simonova, E., Goryanin, O., Yalovenko, V., Yalovenko, O. Multi-agent approach for developing a digital twin of wheat. In Proceedings of IEEE SMARTCOMP '2020, Bologna, Italy, 14-17 September 2020; IEEE: SMARTCOMP 2020 IEEE Catalog Number: CFP2016Z-ART, 2020; pp. 268-273.*
10. *Skobelev, P., Mayorov, I., Simonova, E., Goryanin, O., Zhilyaev, A., Tabachinskiy, A., Yalovenko, V. Development of models and methods for creating a digital twin of plant within the cyber-physical system for precision farming management. J. Phys.: Conf. Ser. 2020, 1705, 012022.*
11. *Skobelev P., Simonova E., Smirnov S., Budaev D., Voshchuk G., Morokov A. Development of knowledge base in the “Smart Farming” system for agricultural enterprise management. Procedia Computer Science 2019, 150, pp. 154-161.*
12. *Galuzin, V.; Galitskaya, A.; Grachev, S.; Larukhin, V.; Novichkov, D.; Skobelev, P.; Zhilyaev, A. Autonomous Digital Twin of Enterprise: Method and Toolset for Knowledge-Based Multi-Agent Adaptive Management of Tasks and Resources in Real Time. Mathematics 2022, 10, 1662.*
13. The Planteome database: an integrated resource for reference ontologies, plant genomics and phenomics» // Published online in «Nucleic Acids Research» D1168–D1180, 2018, Vol. 46, Database issue, 23 November 2017. doi: 10.1093/nar/gkx1152.
14. *Jonquet C., Toulet A., Arnaud E. et al. A vocabulary and ontology repository for agronomy // Computers and Electronics in Agriculture, 2018; 144, pp. 126-143.*
15. IBM Corp. Agriculture management based on farmer expertise and interests, 2020, US Patent 10,783,594.
16. Digital Twin Solutions for Smart Farming, R&DWorld. – URL: rdworldonline.com (дата обращения 20.10.2021).
17. *Mikhailov D., Fedorov V., Mitrokhin M. Using artificial intelligence systems for intensive safe cultivation of crops – short communication // International Journal of Agricultural Technology, 2021, Vol. 17(3), pp. 987-990. – URL: [http://www.ijat-aatsea.com/pdf/v17_n3_2021_May/15_IJAT_17\(3\)_2021_Mikhailov,%20D..pdf](http://www.ijat-aatsea.com/pdf/v17_n3_2021_May/15_IJAT_17(3)_2021_Mikhailov,%20D..pdf) (дата обращения 23.12.2021).*
18. *Ruijs M.; Kootstra G.; Evers J.; van Mourik, S.; van de Zedde, R. The Digital Twin Project Virtual Tomato Crops (VTC). Project Announcement. – URL: <https://www.wur.nl/en/show/The-Digital-Twin-project-Virtual-Tomato-Crops.htm> (дата обращения 21.12.2021).*
19. *Carroll, C. Apparatus and Method for Assessing a Characteristic of a Plant, 2020, US Patent 2020302338.*
20. *Полуэктов Р.А., Терлеев В.В. Имитационно-моделирующий комплекс AGROTOOL. v.3. Алгоритмическая структура модели. Российская академия сельскохозяйственных наук. Агрофизический научно-исследовательский институт. Санкт-Петербург, 2007 / [Электронный ресурс] – <http://agrotool.ru/content/files/asm.pdf> (дата обращения 22.02.2021).*
21. *Горянин О.И. Возделывание полевых культур в Среднем Заволжье. Самара. – 2019. – 345 с.*
22. Биологические особенности выращивания озимой пшеницы. – URL: <https://news.myseldon.com/ru/news/index/231498266> (дата обращения 20.12.2021).
23. Гидротермический коэффициент Селянинова. – URL: <http://meteorologist.ru/gidrotermicheskiy-koeffitsient-selyaninova.html> (дата обращения 15.05.2022)
24. Plants can detect insect attacks by ‘sniffing’ each other’s aromas. – URL: <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/plants-can-detect-insect-attacks-sniffing-each-others-aromas#:~:text=Fragment%20aromas%20from%20plants%20can,or%20summon%20the%20insects'%20predators> (дата обращения 18.05.2022)

**REGARDING SOME OF THE METHODS
FOR CROP STATE CALCULATION IN DIGITAL TWIN OF PLANT**

© 2022 P.O. Skobelev^{1,2}, A.S. Tabachinskiy^{1,2}, E.V. Simonova³, Yu.N. Zhuravel⁴, G.N. Miatov¹

¹ Samara State Technical University, Samara, Russia

² Samara Federal Research Center of Russian Academy of Sciences, Samara, Russia

³ Samara National Research University, Samara, Russia

⁴ Rocket Space Center “Progress”, Samara, Russia

In this paper, a concept of digital twin of plant, which is a decision support system to implement precise farming technologies. Digital twin of plant allows to forecast and simulate real crop state and suggest agricultural measures to the fields based on weather and soil data. Digital twin of plant is developed with the use of multi-agent technologies and ontology-based domain formalization.

Key words: digital twin of plant, precise farming, decision support, multi-agent technologies, crop growth model.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-3-100-111

Petr Skobelev, D.T.Sc., Chief Researcher of “Digital Twins of Plants” Lab at Samara Federal Research Center of RAS, Head of Department “Electronical Systems and Information Security” at Samara State Technical University.

E-mail: petr.skobelev@gmail.com

Aleksey Tabachinskiy, PhD, Head of “Digital Twins of Plants” Lab at Samara Federal Research Center of RAS, Associate Professor and Researcher of “Theoretical and Basic Electrical Engineering” Department at Samara State Technical University. E-mail: tabachinski.as@samgtu.ru

Elena Simonova, PhD, Associate Professor of Information Systems and Technologies Department at Samara University. E-mail: simonova@smartsolutions-123.ru

Yulia Zhuravel, Lead Specialist at Rocket Space Center “Progress”. E-mail: ntsomz_5@mail.ru

Gennady Myatov, D.T.Sc, Professor of Electrical Drives and Automation Department at Samara State Technical University. E-mail: miatov@mail.ru