

УДК 519.688

РАЗРАБОТКА ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КУЛЬТУР ДЛЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА РАСТЕНИЙ

А.С. Табачинский

Самарский федеральный исследовательский центр РАН
Россия, 443001, Самара, Студенческий пер., 3А
ООО «Смарт Агро Лаб»
Россия, 443020, Самара, ул. Самарская, 63
E-mail: tabachinski.as@samgtu.ru

А.О. Стрижаков

Самарский государственный аграрный университет
Россия, 446442, Самарская обл., г. Кинель, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 1
E-mail: an.sgau20@mail.ru

А.А. Галузин

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34
E-mail: alekseegaluzin@mail.ru

Ю.Н. Журавель

ООО «Научно-производственная компания «Аэропатруль»
Россия, 443184, Самара, Заводское шоссе, 36, офис 205
E-mail: nts@mail.ru

Ключевые слова: онтология; растениеводство; цифровой двойник растений; мультиагентные технологии; производственный процесс.

Аннотация: В статье предлагается унифицированное описание сортов растений на основе онтологии растениеводства, пригодное для использования в разработанном ранее цифровом двойнике растений. В качестве основы описания каждого сорта лежит производственный процесс каждой культуры, который декомпозируется на стадии роста и развития растения и описание требуемых погодных условий, почвенных и других ресурсов для каждой стадии. На основе указанных знаний цифровой двойник адаптивно строит план выращивания посева по каждой стадии, за счет применения мультиагентных технологий, сопоставляя план и наблюдаемый результат и синхронизируя состояние виртуального и реального растения. Предлагаемая онтологическая модель должна позволить расширить области применения цифрового двойника растений на растениеводческих предприятиях и способствовать их переходу к точному земледелию.

1. Введение

Цифровые двойники (ЦД) – новое направление в области информационных технологий, появившееся в результате конвергенции систем моделирования, интеллектуальных систем, кибер-физических систем, интернета вещей и ряда других [1].

В настоящее время ЦД быстро эволюционируют от цифровых теней, фактически построенных на массивах данных – к цифровым двойникам, основанным на моделях

объектов и процессов, и наконец, к адаптивным, умным и когнитивным цифровым двойникам, основанным на знаниях.

Но если в промышленности ЦД уже заняли свое достойное место, сопровождая сложные изделия на всем их жизненном цикле, то в области сельского хозяйства в настоящее время наблюдается активный рост интереса к цифровым двойникам «всего», включая почву полей, растений и животных, теплиц и т.д. [2].

При этом в качестве моделей, применяемых для создания ЦД растений (ЦДР), применяются следующие подходы: математические модели, выраженные в виде систем дифференциальных или алгебраических уравнений, экспертных систем, нейронных сетей и машинного обучения, а также имитационных моделей.

В настоящей работе под цифровым двойником растений (ЦДР) понимается интеллектуальная кибер-физическая система, позволяющая планировать и моделировать стадии роста и развития растений, а также непрерывно синхронизировать состояние виртуального и реального растения на основе поступающего факта [3-5].

Разработанный ЦДР базируется на использовании онтологий, которые используются для настройки ЦДР на новую культуру растений, и мультиагентных технологий, которые должны обеспечить нелинейность поведения посевов растений и адаптивность для синхронизации состояния ЦДР с состоянием реальных растений.

Предлагаемый ЦДР направлен на внедрение принципов точного земледелия за счет предоставления агрономам возможности непрерывно перестраивать прогнозы длительности стадий роста и развития растений, урожайности посевов растений и других параметров, что в дальнейшем может сопровождаться и выдачей ситуативно-чувствительных рекомендаций по проведению агрономических мероприятий.

2. Постановка задачи

В настоящем докладе предлагается расширенное и унифицированное описание сортов растений на основе онтологии растениеводства, пригодное для использования в разработанном ранее ЦДР.

В основу описания каждого сорта предлагается положить производственный процесс каждой культуры, который декомпозируется на стадии роста и развития растения, с формализованным описанием требований к ресурсам для каждой стадии, и описание требуемых на каждой стадии погодных условий, почвенных и других ресурсов.

На основе указанных знаний мультиагентная подсистема ЦДР должна адаптивно строить план выращивания посева по каждой стадии, сопоставляя план и наблюдаемый результат и синхронизируя состояние виртуального и реального растения.

Предлагаемая в работе онтологическая модель должна позволить расширить области применения ЦДР на растениеводческих предприятиях и способствовать ускорению их переходу к точному земледелию.

Предлагаемое унифицированное описание каждого сорта растения должно содержать в себе следующие сведения:

- Название сорта и его связь с другими сортами;
- Основные стадии роста и развития растений с правилами перехода между фазами;
- Требования к ресурсам, потребляемым на каждой стадии;
- Список входных параметров для каждой стадии, которые определяют производственный процесс культуры на данной стадии;
- Список выходных параметров для каждой стадии;
- Потенциал сорта по урожайности;

- Функциональные зависимости между выходными и входными параметрами стадий от факторов внешней среды и от состояния самого растения для каждого сорта;
- Другие особенности каждого сорта, которые могут динамически пополняться для различных сортов растений.

При этом в основу мультиагентного метода расчетов, который и должен настраиваться за счет создаваемого унифицированного онтологического описания, положена модель «трубок» изменения параметров растений, которая показывает идеальную траекторию роста и развития растений, а также границы области линейности зависимости параметров и критические границы диапазонов этих параметров, при выходе за которые, как правило, растения погибают.

Предполагается, что относительная простота предложенной начальной модели и метода расчета может быть компенсирована более частой синхронизации с состоянием реального растения путём внесения данных о факте погоды, результатов наблюдений агрономов и лабораторных анализов почвы и листьев растений, и других параметров.

В перспективе, предложенная модель должна стать «каркасом» для последующего наращивания как предметных знаний, так и машинного обучения на каждой стадии.

2. Предлагаемый подход

В основу предлагаемого подхода положено понятие онтологии предметной области, которое применяется для растениеводства.

Онтология растениеводства включает классы объектов, характеризующих различные группы сортов растений и их гибридов, описание моделей сортов как совокупности правил роста на каждой стадии, а также в перспективе агротехнические меры посева, вредные насекомые и болезни, способы борьбы с ними, подкормки растений и ряд других понятий.

Покажем наиболее общие понятия, предложенные для онтологии растениеводства:

1. Класс «Культура». Каждая культура относится к группе определенных культур и подвержена либо успешному, средне-нормальному или плохому развитию, включая даже гибель, при определенных условиях. Условия для каждого режима должны быть формально описаны определенными значениями параметров и правилами переходов между состояниями растений. Помимо погодных условий, показывается потребность в ресурсах для питания растений. В перспективе должны быть указаны возникающие болезни и опасные вредители, а также методы и средства борьбы с ними, рекомендуемые агротехнические мероприятия.

2. Класс «Сорт», который отнесен к классу «Культура». Это понятие связано с понятием «Потенциал урожайности», а также связан с массивом соответствующих конкретизированных значений «трубок» параметров растения на каждой стадии, включая входные и выходные параметры. Сорт имеет с понятием «Модель сорта», которая содержит еще более детализируемые значения параметров «трубок» по каждой стадии, описывающих влияние погодно-климатических, почвенных и других условий.

Примеры формализуемых понятий и отношений представлены в Таблицах 1-4.

Таблица 1. Класс «Культура» онтологии и связывающие отношения.

Исходное понятие	Отношения	Связанное понятие
Культура	Характеризуется «Структура растения» Характеризуется «Урожайность» Характеризуется «Выходные параметры» Характеризуется «Входные параметры» Обладает «Стадии роста и развития» Относится к «Группа культур»	Структура растения Потенциал урожайности Типы выходных параметров стадий Типы входных параметров стадий Стадии роста и развития Классы культур растений

Таблица 2. Класс «Сорт» онтологии и связывающие отношения.

Исходное понятие	Отношения	Связанные понятия
Сорт культуры	Относится к «Культура» Имеет «Модель сорта» Имеет «Жизненный цикл»	Урожайность Жизненный цикл растения Максимальное значение выходного параметра N Минимальное значение выходного параметра N

3. Класс «Стадия» описывает часть конкретного жизненного цикла одной из культур (сорта), продолжительность которой определяется конкретной ситуацией с погодой, почвой и т.д. Длительность рассчитывается на основе модели трубок и правил перехода между стадиями, например, имеются правила накопления определённой суммы активных температур или правила потребности в определенных ресурсах воды и почвы.

Отклонения от идеальных требуемых параметров приводит к замедлению роста и развития и угнетению растений, что сопровождается увеличением или сокращением их продолжительности.

Таблица 3. Класс «Стадия» онтологии и связывающие отношения.

Исходное понятие	Отношения	Связанные понятия
Стадия	Входит в «Жизненный цикл» Связана с сортом растения Имеет «Правило»	Следующая стадия Предшествующая стадия Жизненный цикл

4. Класс «Модель сорта» представляет собой набор трубок значений входных и выходных параметров каждой стадии роста и развития растения и связывающих их зависимостей, представленных в виде правил, таблиц и других формах. Сортовые модели построены на основании сведений от селекционеров о сорте. Интервалы входных параметров взяты из справочных данных по культурам, отражающих их усредненные биологические особенности, но каждый агроном может корректировать эти данные с учетом особенностей своего хозяйства и своего опыта.

Для изучаемых сортов пшеницы данные были взяты из экспериментальных исследований, проводимых на полях Самарского НИИСХ, Поволжского НИИСС и Ульяновского НИИСХ в период 2022-2023 гг.

В таблице 4 приведена функциональная зависимость ряда выходных параметров от фактора «Запас продуктивной влаги на горизонте 0-10 см».

Таблица 4. Фрагмент класса «Модель сорта» онтологии и связывающие отношения

ЗПВ, 0-10 см, мм	Критический max	60	Вторичная корневая система (есть/нет)	Нет	Длина стебля, см	7	Количество листьев, шт	5
	Optimal	17		Да		11		8
	Критический min	0		Нет		8		4

Разработанные унифицированные модели сорта для каждого из взятых в качестве примера сортов (каковых сейчас разработано 7 сортов озимой пшеницы и 3 сорта яровой пшеницы) включает аналогичные функциональные зависимости для восьми факторов внешней среды, а также 21 выходного параметра растений.

Дальнейшие направления разработок связаны с разработкой механизмов интеграции полипредметных знаний, используемых как в аграрных, так и в фундаментальных науках, включая физику, химию и другие.

3. Заключение

В статье описан предлагаемый подход к унификации онтологических описаний знаний о сортах растений для использования в ЦДР.

В этих целях предлагается онтология растениеводства, которая описывает культуры и сорта растений, включая их состав и стадии роста и развития растений, требования к потребляемым ресурсам воды и питания и ряд других особенностей.

Указанная онтология должна быть встроена в мультиагентную подсистему ЦДР для формирования планов и моделирования производственного процесса роста и развития посевов различных культур на полях и синхронизации состояний реального и виртуального растения на основе фактических и прогнозных данных об окружающей среде и особенностях самого посева.

Представленный подход позволяет реализовать следующие преимущества:

- 1) Унифицированная формализация производственного процесса любой культуры в агрономических терминах, привычных и удобных для агрономов;
- 2) Сокращаются сроки и стоимость разработки ЦДР для новых культур;
- 3) Учитываются индивидуальные особенности каждой культуры.

Относительным недостатком разработки будет повышение сложности мультиагентной модели, которая должна быть поддерживать более широкий спектр возможных различных моделей растений, соответствующих онтологии растениеводства.

В результате разработки внедрение ЦДР должно стать доступным для растениеводческих хозяйств любого масштаба.

Список литературы

1. Прохоров А., Лысачев М.. Цифровой двойник: анализ, тренды. Мировой опыт / Под редакцией А. Боровкова. Росэнергоатом, 2020. 404 с.
2. Stock M., Pieters O., De Swaef T., Wyffels F. Plant science in the age of simulation intelligence // Front. Plant Sci. 2024. Vol. 14. P. 1299208. doi: 10.3389/fpls.2023.1299208.
3. 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 CPS for precision farming management // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1703. P. 12-22.
4. Скобелев П.О., Табачинский А.С., Симонова Е.В. и др. О некоторых методах расчёта состояния посевов в сервисе цифрового двойника растений // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2022. Т. 24, № 3 (107). С. 100-111.

5. Skobelev P., Simonova E., et al. Further advances in models and methods for digital twins of plants // Proceedings of the 16th International Conference on INnovation in Intelligent SysTems and Applications (INISTA 2022). August 8th-12th, 2022, Biarritz, France.