

Развитие сортовой модели озимой пшеницы для цифрового двойника растения

Петр Скобелев
Самарский государственный
технический университет
Самара, Россия
petr.skobelev@gmail.com

Алексей Табачинский
Самарский государственный
технический университет
Самара, Россия
tabachinski.as@samgtu.ru

Елена Симонова
Самарский национальный
исследовательский университет
Самара, Россия
simonova.elena.v@gmail.com

Анатолий Стрижаков
Самарский государственный
аграрный университет
Самара, Россия
an.sgau20@mail.ru

Евгений Кудряков
Самарский государственный
аграрный университет
Самара, Россия
kudryakov-e.v@ya.ru

Tzong-Ru Lee
National Chung Hsing University
Тайчунг, Тайвань
trlee@dragon.nchu.edu.tw

Yung-Kuan Chan
National Chung Hsing University
Тайчунг, Тайвань
ykchan@dragon.nchu.edu.tw

Abstract — В статье описана разработка сортовых моделей сортов озимой пшеницы для цифрового двойника растений – программного обеспечения, позволяющего моделировать производственный процесс посевов на основе данных о факторах внешней среды, а также агрономических особенностях посевов. В развитие разработанной ранее онтологии растениеводства, описывающей базовые концепты и отношения производственного процесса любой культуры, в данной статье приводится описание и принципы работы сортовых моделей озимой пшеницы, которые учитывают генетические особенности влияния тех или иных факторов на растение, а также особенности их развития, для расчёта расширяемого числа параметров каждой фенологической стадии посева пшеницы. Применение таких сортовых моделей является следствием существующей архитектуры мультиагентной модели цифрового двойника растений (ЦДР), и значительно расширяет сферу применения и функциональность программы ЦДР в части прогнозирования состояния посевов. Приведены конкретные параметры сортовой модели сорта озимой пшеницы «Вьюга», а также оценка подверженности этого сорта ряду факторов. Приведены результаты разработки сортовых моделей и перспективы дальнейшего применения их в ЦДР.

Ключевые слова — точное земледелие, цифровой двойник, сортовая модель, мультиагентные технологии, онтология

Одной из современных тенденций в сельском хозяйстве является разработка кибер-физических систем (КФС) для точного земледелия, в состав которых обычно входят датчики, компьютерные и коммуникационные модули, а также исполнительные механизмы подачи воды, питания для растений и т.д. Однако, глобальные изменения климата приводят к необходимости развития сложившихся технологий выращивания сельскохозяйственных культур в направлении интеллектуализации КФС для поддержки принятия решений агрономами и фермерами и повышения эффективности дорогостоящего точного земледелия.

Одним из возможных направлений для решения этой задачи является разработка цифровых двойников

растений (ЦДР), позволяющих на основе интеграции КФС с базами знаний (БЗ) и интеллектуальными системами принятия решений планировать и моделировать стадии роста и развития растений, чтобы обеспечивать устойчивое и эффективное развитие агропромышленного бизнеса [1].

Определим понятие «Цифровой двойник растений» как программу, которая моделирует производственный процесс посевов на основе данных об окружающей среде, который выполняет регулярную синхронизацию с реальным растением, например, посредством осмотров агрономами [2].

ЦДР строит прогнозы для двух групп параметров:

- длительность стадий роста и развития посевов;
- параметры растения, урожайность и качество урожая.

Под понятием «рост» понимается увеличение растения в размерах (массе, объёме). Под понятием «развитие» понимается переход на следующую стадию. Рост и развитие растений происходит за счёт использования ресурсов. Длительность стадии развития определяется скоростью развития растений. Скорость развития зависит от пригодности условий внешней среды, определяемой функцией удовлетворённости растения уровнем конкретного ресурса и их совокупности.

Для построения прогнозов урожайности культуры и других параметров растения ЦДР использует следующие входные данные:

- начальные параметры посева, вводимые агрономом;
- сортовую модель, загружаемую из базы знаний;
- сведения об актуальной погоде с метеостанций;
- сведения о среднемноголетней погоде;
- ресурсы;
- сведения о состоянии посевов и ресурсов, периодически вводимые агрономом в режиме синхронизации.

Сортовая модель растения описывает следующие характеристики:

- группу спелости;
- номинальную длительность жизненного цикла;
- перечень ресурсов и их влияние на подверженные параметры растения в течение жизненного цикла.

В среде ЦДР применяется метод оценки длительности стадий развития и урожайности, основанный на понятии рабочей «трубки» изменения наиболее важных факторов, оказывающих влияние на развитие растений, определенных в результате консультаций с практикующими агрономами. «Трубкой» параметров называется идеальный (номинальный) диапазон изменения каждого фактора, влияющего на развитие растения. При первоначальном описании роста и развития растения на разных стадиях используются линейные зависимости. Отклонение входного параметра внешней среды от «идеала» повлечет за собой линейные изменения сроков развития и урожайности растения. Отклонение параметров за границу максимально допустимых значений ведет, в большинстве случаев, к гибели растения и, как следствие, потере урожая [3].

Для каждой стадии в сортовой модели параметры ЦДР и их связи, определяющие влияние на значения зависимых параметров следующей стадии, представляется с помощью графа параметров по стадиям роста и развития. В сортовой модели возможен также учёт влияния предшественников и репродукций семян на параметры растения и урожайность.

Температура может быть допустимой (от критического минимума до критического максимума), оптимальной и недопустимой (меньше критического минимума или больше критического максимума).

Агент стадии рассчитывает ежесуточное значение функции удовлетворённости (ФУ) растения значением температуры в зависимости от того, в какой интервал трубки сортовой модели попадает температура. На рис. 1 приведена такая диаграмма для удовлетворённости температурой урожайности согласно табл. I.

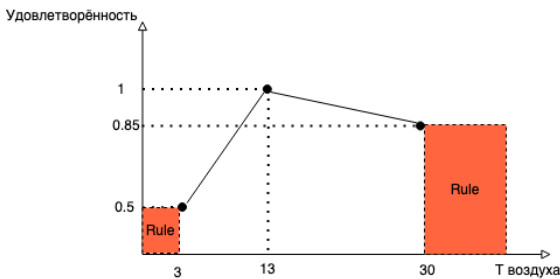


Рис. 1. Вид функции удовлетворённости агента стадии в зависимости от величины ресурса температуры

Поведение функции удовлетворённости в интервалах 1 и 2, а также 4 и 5 идентично – ФУ линейно убывает до нуля, отличаясь наклоном к оси абсцисс в минимальной и максимальной области. Значения из сортовой модели определяют функцию удовлетворённости через две точки – $(T_{opt}; 1)$ и $(T_{cr\ min}; Y_{min}/Y_{opt})$, где Y – значение параметра ФУ для данного значения аргумента T .

Совместное влияние ресурсов описывается арифметическим оператором (минимум, максимум, среднее) в БЗ.

Для значений факторов, зарегистрированных в данные даты, в зависимости от актуальной фенологической стадии были применены те или иные

описанные в сортовой модели правила роста и расчёта параметров этих стадий. Рассмотрим ряд технологических параметров, определяющий класс урожая, которые начинают морфологически проявляться в растении с появлением зерновки, то есть со стадии «Колошение». Рассматриваемыми параметрами являются: Индекс деформации клейковины (ИДК), Натура, Число падения и Урожайность. В результате получены значения для каждого из описанных в сортовой модели параметров на конец каждой стадии, рассчитанные относительно значения на предыдущей стадии по накопленному штрафу за время стадии. Приведём также результаты расчёта остальных параметров на срок сбора урожая, а также их сравнение с фактическими замерами лаборатории.

Таблица I. СРАВНЕНИЕ РАСЧЁТА ЦДР С ФАКТОМ

Параметр	ИДК, ед	Натура, г/л	Число падения, с	Урожайность, ц/га
Факт	96	825	274	20,9
ЦДР	75,88	700,77	155,8	20,15

Как можно видеть из результата расчёта, точность определения некоторых параметров оказалась низка. Сезон 2023 являлся первым годом апробации разработанной сортовой модели ЦДР на реальных данных, благодаря чему был подготовлен обширный датасет фактических значений для ряда исследуемых сортов озимой и яровой пшеницы на полях филиалов СамНЦ РАН. В результате обучения по фактическим данным, будут определены уточнённые параметры функций удовлетворённости факторами, что позволит увеличить точность прогноза ЦДР и проверить работу программы на данных сезона 2024.

REFERENCES

[1] Verdouw, C. Digital twins in smart farming / C. Verdouw, B. Tekinerdogan, A. Beulens, S. Wolfert / Agricultural Systems. – 2021. – Vol. 189. – P. 103046.

[2] Skobelev, P. 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 / P. Skobelev, I. Mayorov, E. Simonova et al // Cyber-Physical Systems, Digital Technologies and Applications. – 2021. – Vol. 350 – P. 83-96.

[3] Skobelev, P. Development of models and methods for creating a digital twin of plant within the cyber-physical system for precision farming management / P. Skobelev, I. Mayorov, E. Simonova et al // Journal of Physics: Conference Series. – 2020 – Vol. 1703. – P. 012022.

[4] Skobelev, P. Development of crop-simulation multiagent system for smart digital twin of plant / P. Skobelev, A. Tabachinskiy, E. Simonova, et al. // 2023 IX International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT): IEEE. – 2023. – P. 1-8.