

УДК 681.3

# РАЗРАБОТКА МУЛЬТИАГЕНТНОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПОСЕВОВ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА РАСТЕНИЙ

**А.А. Галузин**

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

**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

**Ключевые слова:** растениеводство; цифровой двойник; мультиагентные технологии.

**Аннотация:** В работе предложена концепция мультиагентного метода расчёта выходных параметров сельскохозяйственной культуры в цифровом двойнике растений в зависимости от погодных условий и ресурсных ограничений. В основе метода лежит модель «трубок» – диапазонов идеальных, нормальных и критических для выживания растений значений основных факторов, которые характеризуют основные фазы роста и развития растения и влияние входных параметров внутри каждого из интервалов на выходные параметра растения. В докладе представлен предлагаемый метод расчета, который позволит использовать правила принятия решений из базы знаний для адаптивного пересчета фаз роста и развития растений и прогноза урожайности. Приводится пример работы первой реализации предлагаемого метода для сельскохозяйственной культуры «Озимая пшеница». Обсуждаются полученные результаты и направления дальнейшего развития.

## 1. Введение

Цифровой двойник растения (ЦДР) является цифровой моделью реального посева, позволяющим планировать и моделировать его состояние и поведение в компьютерной среде. В последнее время эта концепция активно применяется для создания автономных цифровых двойников сложных изделий и организаций, а также моделирования работы живых организмов – понимаемых как интеллектуальные киберфизические системы [1]. Разработанные в этих целях онтологические и мультиагентные модели и методы оказались применимы и для широкого круга применений, в том числе, для планирования и моделирования процессов роста и развития растений [2].

Для разработки ЦДР необходимо решить комплексную многофакторную задачу, включающую учёт изменяющихся факторов внешней среды и внутреннее состояние самого растения, характеризующееся нелинейной динамикой роста. Таким образом необходимо разработать такой метод расчета параметров посева, который бы не

зависел от числа фаз роста растения, а также числа и типа их входных и выходных параметров. Кроме того, требуется обеспечить адаптивность пересчета параметров фаз при появлении любых незапланированных событий, связанных с изменениями параметров.

Онтологические и мультиагентные подходы, дополненные методами машинного обучения, представляют инновационный технологический подход к созданию ЦДР для контроля роста и развития растений на всех этапах. Одним из преимуществ использования онтологий в качестве инструмента познания является формализованный подход к изучению предметной области [3]. Мультиагентный подход применяется для решения сложных задач там, где действует много противоречивых факторов, которые влияют на принятие решений и выработку баланса интересов [4, 5].

Базовая модель ЦДР и метод расчета были предложены ранее в работах [6, 7]. В настоящей работе предложена модификация метода расчета для учета множества входных и выходных параметров, заданных на каждой стадии – предполагается, что такой граф взаимосвязи и взаимных влияний отражает одну из важных сторон предметных знаний агрономов, используемых для прогноза длительности стадий и урожайности, а также других параметров растений.

## 2. Предлагаемый подход

Разработка ЦДР основывается на оценке факторов, оказывающих влияние на рост и развитие культуры в целом. К таким факторам можно отнести температуру воздуха, запасы питательных веществ в слое: нитратного N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O. Значения фактора на определенных фазах развития растения являются входными параметрами модели.

Таким образом модель ЦДР сельскохозяйственной культуры включает:

- Набор фаз развития  $P = \{p_i\}, i = \overline{1, L}$ , где  $L$  – число фаз;
- Набор выходных параметров  $O = \{o_j\}, j = \overline{1, M}$ , где  $M$  – число выходных параметров;
- Набор входных параметров  $X = \{x_k\}, k = \overline{1, K}$ , где  $K$  – число влияющих факторов.

На основе значений входных параметров на разных фазах развития растения  $x_{ijk}$  составлены трубки входных параметров. Трубки состоят из критического минимума  $x_{cr1}^{ijk}$ , рекомендованного минимума  $x_{opt1}^{ijk}$ , рекомендованного максимума  $x_{opt2}^{ijk}$ , критического максимума  $x_{cr2}^{ijk}$  входного параметра для каждой фазы и соответствующим им значений прироста выходных параметров  $\Delta y_{cr1}^{ijk}, \Delta y_{opt1}^{ijk}, \Delta y_{opt2}^{ijk}, \Delta y_{cr2}^{ijk}$ . Для нормального развития растения необходимо, чтобы значения входных параметров  $x_{ijk}$  находились между рекомендованным минимум и рекомендованным максимумом. Если значения входных параметров выходят за критические границы, то растение погибает.

Таким образом, влияние фактора  $k$  на прирост выходного параметра  $j$  в рамках фазы  $i$  составляет:

$$\Delta o_{ijk} = \begin{cases} 0, \text{ если } x_{ijk} < x_{cr1}^{ijk} \text{ или } x_{ijk} > x_{cr2}^{ijk} \\ \frac{(x_{ijk} - x_{cr1}^{ijk})(\Delta y_{opt1}^{ijk} - \Delta y_{cr1}^{ijk})}{x_{opt1}^{ijk} - x_{cr1}^{ijk}} + \Delta y_{cr1}^{ijk}, \text{ если } x_{cr1}^{ijk} \leq x_{ijk} < x_{opt1}^{ijk} \\ \frac{(x_{ijk} - x_{opt1}^{ijk})(\Delta y_{opt2}^{ijk} - \Delta y_{opt1}^{ijk})}{x_{opt2}^{ijk} - x_{opt1}^{ijk}} + \Delta y_{opt1}^{ijk}, \text{ если } x_{opt1}^{ijk} \leq x_{ijk} \leq x_{opt2}^{ijk} \\ \frac{(x_{ijk} - x_{opt2}^{ijk})(\Delta y_{cr2}^{ijk} - \Delta y_{opt2}^{ijk})}{x_{cr2}^{ijk} - x_{opt2}^{ijk}} + \Delta y_{opt2}^{ijk}, \text{ если } x_{opt2}^{ijk} < x_{ijk} \leq x_{cr2}^{ijk} \end{cases}$$

Итоговое значение выходного параметра рассчитывается по формуле:

$$o_j = \sum_{i=1}^L \frac{\sum_{k=1}^K \Delta o_{ijk}}{K}$$

Описанная модель будет реализована в мультиагентной системе, где в качестве программных агентов будут выступать фазы роста с/х культуры и потребляемые ресурсы. Задача программного агента фазы – выполнить расчет выходных параметров с учетом ограничений по ресурсам, а агента ресурса – пересчитать свое наличие с учетом выноса веществ растением, его пополнения в ходе погодных явлений или агротехнических мероприятий. При возникновении событий, агент соответствующей стадии пересчитывает выходные параметры по имеющимся ресурсам и прогнозу погоды и передает результат по цепочке, при этом результаты последующих стадий, в перспективе, должны повлиять на решения предыдущих, позволяя моделировать и нелинейные эффекты.

На момент написания данной работы реализация мультиагентной системы включает пока только программных агентов фаз роста с/х культуры. Результаты работы метода, приведенные ниже, уже на данном этапе демонстрируют применимость такого подхода для моделирования продукционного процесса развития растения.

### 3. Результаты моделирования

Для моделирования использовались трубки входных параметров для с/х культуры «Озимая пшеница». В качестве выходного параметра была выбрана высота растения. В таблице 1 представлены трубки влияющих факторов для фазы «Прорастание».

Таблица 1. Трубки входных параметров для фазы «Прорастание».

Название входного параметра		Значение входного параметра	Значение дельты выходного параметра высоты растения
Т воздуха, °С	Критический минимум	30	5
	Рекомендованный минимум	15	6
	Рекомендованный максимум	12	4
	Критический максимум	3	3
Запасы питательных веществ в слое, 0 – 30 см нитратного N, мг/кг	Критический минимум	200	4
	Рекомендованный минимум	30	4
	Рекомендованный максимум	10	4
	Критический максимум	3	4
Запасы питательных веществ в слое, 0 – 30 см P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг	Критический минимум	800	4
	Рекомендованный минимум	300	4
	Рекомендованный максимум	100	4

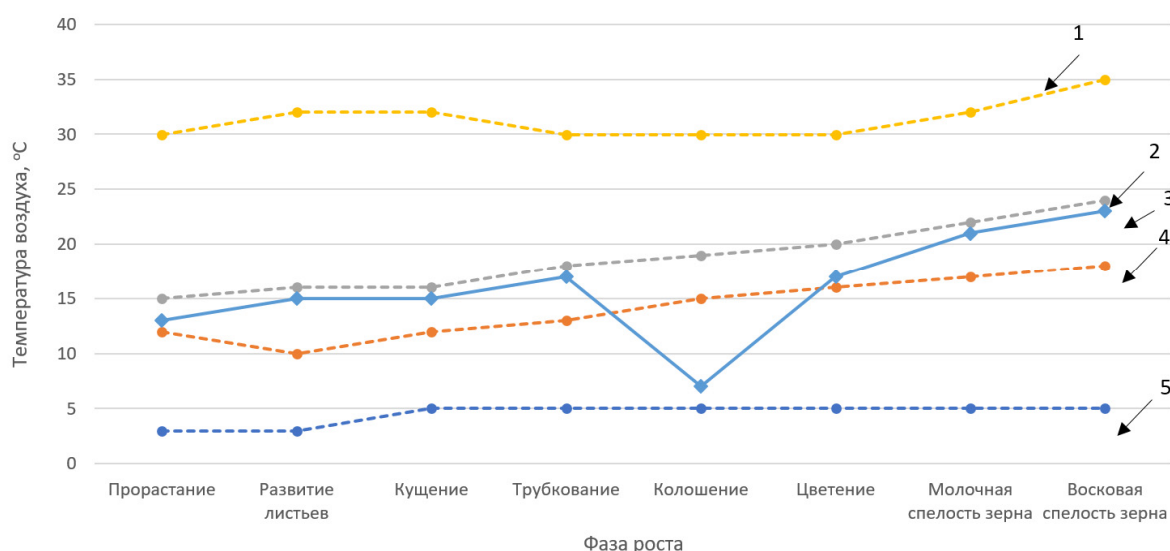
	Критический максимум	20	4
Запасы питательных веществ в слое, 0 – 30 см K <sub>2</sub> O, мг/кг	Критический минимум	800	4
	Рекомендованный минимум	180	4
	Рекомендованный максимум	80	4
	Критический максимум	20	4

В таблице 2 приведены значения входных данных для каждой фазы развития с/х культуры.

**Таблица 2.** Входные данные для каждой фазы развития с/х культуры «Озимая пшеница».

Название фазы	Т воздуха, °С	Запасы питательных веществ в слое, 0 – 30 см нитратного N, мг/кг	Запасы питательных веществ в слое, 0 – 30 см P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг	Запасы питательных веществ в слое, 0 – 30 см K <sub>2</sub> O, мг/кг
«Прорастание»	13	15	180	175
«Развитие листьев»	15	14	185	185
«Кущение»	15	16	200	180
«Трубкавание»	17	15	250	190
«Колошение»	7	17	235	195
«Цветение»	17	13	213	190
«Молочная спелость зерна»	21	12	200	175
«Восковая спелость зерна»	23	18	186	160

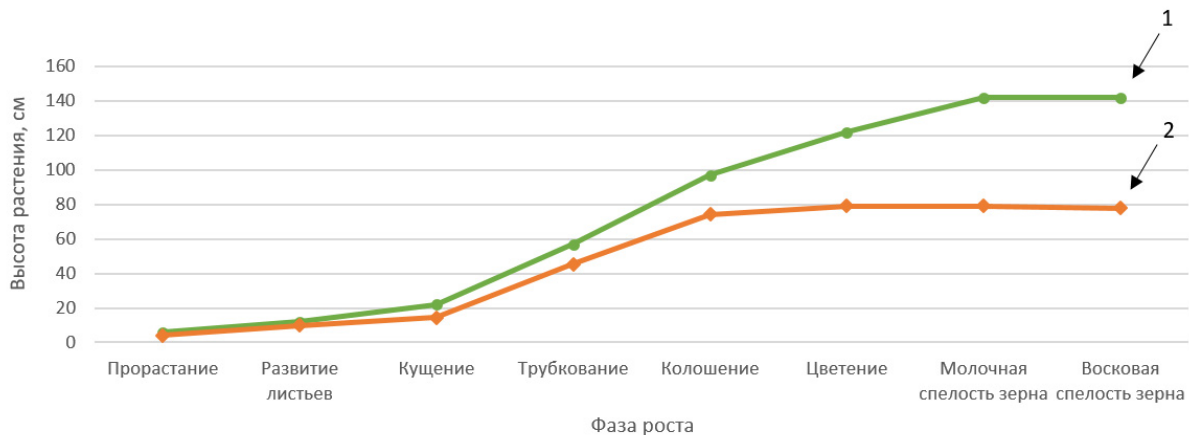
Пример графиков для граничных значений трубки фактора «Температура воздуха» и входного значения фактора на каждой фазе приведены на рис. 1.



**Рис. 1.** Пример графика температуры воздуха, где 1 – критический максимум, 2 – рекомендуемый максимум, 3 – входное значение фактора, 4 – рекомендуемый минимум, 5 – критический минимум.

Пример графика со значениями выходного параметра высоты растения для каждой фазы приведен на рис. 2.

Как видно из графиков (рис. 1), фактор «Температура воздуха» на стадии колошения вышел за границу рекомендуемого минимума (при этом остальные влияющие факторы оставались в рамках рекомендуемых значений на всех фазах роста), из-за чего прогнозируемое значение высоты растения (рис. 2) значительно отклонилось от нормы.



**Рис. 2.** Пример графика с параметром высоты, где 1 – норма высоты растения, 2 – прогнозируемая высота растения.

## 4. Заключение

В работе представлен модифицированный метод расчёта выходных параметров сельскохозяйственной культуры в ЦДР на основе модели трубок факторов, которые характеризуют фазы развития растения и влияние входных параметров внутри каждого из интервалов на выходные параметра растения. Результаты моделирования для первой реализации, включающей программных агентов фаз роста, показывают применимость такого подхода для симуляции продукционного процесса развития растения.

Дальнейшие исследования будут направлены на реализацию расчетов с участием программных агентов потребляемых ресурсов для оптимизации потребления питательных веществ с/х культурой в зависимости от текущих значений выходных параметров на фазах роста и адаптивного пересчета выходных параметров фаз по событиям.

## Список литературы

1. Galuzin V., Galitskaya A., Grachev S., et al. The Autonomous Digital Twin of Enterprise: Method and Toolset for Knowledge-Based Multi-Agent Adaptive Management of Tasks and Resources in Real Time // Mathematics. 2022. Vol. 10, No. 10. P. 1662.
2. Грачев С.П., Жилияев А.А., Ларюхин В.Б., и др. Методы и средства построения интеллектуальных систем для решения сложных задач адаптивного управления ресурсами в реальном времени // Автоматика и телемеханика. 2021. № 11. С. 30-67.
3. Голубев С.С., Щербаков А.Г. Методология управления промышленными технологиями. М.: Первое экономическое издательство. 2020. 276 с.
4. Rzevski G., Skobelev P. Managing Complexity. London: WIT Press. 2014. 156 p.
5. Rzevski G., Skobelev P., Zhilyaev A. Emergent Intelligence in Smart Ecosystems: Conflicts Resolution by Reaching Consensus in Resource Management // Mathematics. 2022. Vol. 10, No. 11. P. 1923.

6. Skobelev P., Mayorov I., Simonova E., et al. 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. Vol. 1703. P. 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/1703/1/012022.
7. Skobelev P., Mayorov I., Simonova E., et al. 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 // Cyber-Physical Systems: Digital Technologies and Applications. Kravets A.G., et al. (Eds). Springer, 2021. SSDC. Vol. 350. P. 83-96.