

УДК 631.5:004.94

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР В ЦИФРОВОМ ДВОЙНИКЕ ПОСЕВОВ РАСТЕНИЙ

П.О. Скобелев¹, А.А. Галузин²

¹ Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва
Россия, 443086, г. Самара, Московское ш., 34

E-mail: petr.skobelev@gmail.com, aleksejgaluzin@mail.ru

Аннотация. Предложен метод расчета выходных параметров сельскохозяйственной культуры в цифровом двойнике посевов растений в зависимости от погодных условий и ресурсных ограничений среды. Цифровой двойник растений – моделирующая система, синхронизируемая с результатами наблюдений, которая позволяет задавать параметры сорта и внешней среды и получать план роста и развития растения и прогноз урожайности. В основе метода лежит модель «трубок» входных и выходных параметров стадий роста и развития растений – диапазонов важных для выживания растений значений основных факторов окружающей среды для каждого сорта растения. Эти диапазоны условно делятся на три категории: оптимальные, при которых растение демонстрирует наилучшие показатели развития; рекомендуемые, обеспечивающие стабильный рост без значительных стрессов; и критические, при выходе за пределы которых возможны необратимые нарушения в физиологических процессах растения, включая его гибель. Предлагаемый метод расчетов на основе имеющихся данных о погодных условиях и доступных ресурсах позволяет связать входные и выходные параметры текущей стадии и передать полученные результаты для расчета следующей стадии, чтобы выстроить итоговый кусочно-линейный план роста и развития растения и дать прогноз урожайности и других параметров растения. В рамках эксперимента рассматривается сорт культуры «Озимая пшеница», рост и развитие которого моделируются при различных сценариях изменения погодных условий. Результаты сопоставляются с фактическими результатами натурного эксперимента в реальных условиях на полях СамНЦ РАН. В качестве параметров рассматриваются урожайность и некоторые параметры растений, в частности их высота. Обсуждаются полученные результаты, дается оценка выявленным расхождениям по различным сценариям, формулируются выводы о применимости предлагаемого метода для практического использования и предлагаются направления дальнейших исследований и разработок.

Ключевые слова: точное земледелие, цифровой двойник, развитие растений, озимая пшеница, виртуальная модель, моделирование.



© Автор(ы), 2025

¹ Петр Олегович Скобелев, доктор технических наук, профессор кафедры информатики и вычислительной техники.

² Алексей Андреевич Галузин, магистрант.

Введение

Эффективное управление растениеводством в рамках точного земледелия ставит целью повышение урожайности, снижение затрат и минимизацию вреда для окружающей среды.

Одной из ключевых культур для Российской Федерации является пшеница [1]. Масса собранной озимой пшеницы в Самарской области за период с 2013 по 2023 годы составляла от 606 до 1374,4 тыс. т, в т.ч.: в 2017 году – 1321,4 тыс. т, в 2018 году – 880,5 тыс. т, в 2019 году – 709,1 тыс. т, в 2020 году – 1633,6 тыс. т¹. Приведенные сведения показывают значительные изменения массы собранного зерна в зависимости в т. ч. от погодных условий.

Однако прогнозирование урожайности остается сложной задачей для агрономов и фермеров из-за ограниченной доступности надежных математических моделей, которые точно отражают физиологи растений и взаимодействие с окружающей средой. Многие сорта сельскохозяйственных (с/х) растений являются искусственно созданными и постоянно обновляются. Это не позволяет собрать большие объемы данных и провести статистически значимую обработку данных в различных условиях, чтобы построить точные и достоверные модели. Большой вклад в процессы роста и развития растений вносят технологии агрономической обработки семян, растений и почвы полей, отчасти компенсирующие неблагоприятные факторы внешней среды.

Кроме неопределенности и колебаний погодных условий, трудности прогнозирования роста и развития с/х культур являются следствием недостаточности агрометеорологических наблюдений сети гидрометеостанций на производственных посевах [2]. Обычно на практике применяют анализ данных дистанционного зондирования Земли [3]. Анализ этих данных в ряде случаев является достаточным для мониторинга (и отчасти прогнозирования) роста и развития посевов на больших территориях, но для управления хозяйствами необходимы более точные модели роста и развития растений, позволяющие вести достоверное прогнозирование и рассчитывать влияние факторов внешней среды на выходные параметры растений.

Традиционные математические модели, статистические методы и существующие информационные технологии предоставляют агрономам и фермерам лишь ограниченную поддержку в принятии обоснованных решений. Становится актуальной задача разработки новых подходов, которые можно на практике легко и быстро адаптировать к климату региона, сортам выращиваемых растений, особенностям полей каждого хозяйства и т. д. Методы и средства моделирования и прогнозирования развития с/х культур должны способствовать повышению эффективности использования доступных ресурсов, поддерживать подходы точного земледелия, иметь низкую стоимость, быть удобными и простыми на практике.

Важной особенностью разрабатываемых методов и средств моделирования посевов растений должна стать адаптивность, позволяющая гибко перестраивать планы роста и развития растений и оценивать изменения их параметров при возникновении любых погодных событий или проведении агротехнических мероприятий.

¹ Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Самарской области. <https://63.rosstat.gov.ru/agriculture>.

Постановка задачи

Предлагаемый подход заключается в разработке цифровых двойников (ЦД) посевов растений (ЦДПР), которые являются цифровыми моделями реального посева, позволяющими прогнозировать его состояние на разных стадиях развития растения в компьютерной среде по определенному агрономами ряду важнейших параметров, характеризующих растение на каждой стадии [4].

Требуется разработать метод расчета длительности стадий роста и развития посевов растений, а для каждой стадии – метод расчета значений выходных параметров в зависимости от значений входных параметров, которые показывают состояние окружающей среды и растения. Так как каждая с/х культура индивидуальна, разные культуры имеют разный состав входных и выходных параметров на разных стадиях, поэтому разрабатываемый метод должен предполагать гибкие изменения состава, типов и числа входных и выходных параметров.

По условиям задачи для каждого сорта с/х культуры задан процесс роста и развития посевов растения на стадиях, состоящий из списка стадий $\text{Process} = \{\text{stage}_i\}$, $i = \overline{1, L}$, где L – количество стадий, или фаз¹. Для каждой фазы задан пополняемый список входных и выходных параметров, а также параметр длительности фазы.

Для каждой стадии вводятся: $\text{In}_i = \{\text{in}_{ij}\}$, $j = \overline{1, K}$, где K – количество влияющих факторов для i -й стадии развития с/х культуры. $\text{Out}_i = \{\text{out}_{ik}\}$, $k = \overline{1, M}$, где M – количество выходных параметров для i -ой стадии развития с/х культуры.

Выходные значения одной стадии могут являться входными для следующей:

$$\text{In}_{i+1} \subset \text{Out}_i.$$

В данной работе в качестве сквозного примера рассмотрены стадии роста и развития с/х культуры «озимая пшеница», которые представлены в [5]. Целью разработки является создание модели растения и метода расчетов, которые могли бы применяться для любых злаковых растений.

Анализ актуальных методов

Для решения задачи прогнозирования роста и развития растения могут быть использованы математические модели.

В статье [6] описана «интегральная» математическая модель роста культурных растений, которая показывает рост органов растения. Так, например, для картофеля запаздывание роста клубней примерно равно двойному запаздыванию роста листьев. Такая модель способна определить особенности роста урожая. В статье [7] описана модель роста растения в часовом масштабе времени. Данная модель может описывать процесс изменения показателя для оценки неизвестных параметров в суточном интервале времени в среднем для совокупности растений на выбранном участке поля или в экспериментальной установке. Так же в [8] и [9] представлены математические модели прогнозирования урожайности.

Таким образом, разработанные математические модели имеют большой потенциал для улучшения эффективности и устойчивости сельскохозяйственного производства. Несмотря на это, существует необходимость в разработке новых методов адаптации алгоритмов под различные условия и культуры.

¹ Термины «фаза» и «стадия» развития в рамках настоящей статьи являются синонимами.

Также ЦД обладают значительным потенциалом для более точного и детализированного моделирования различных процессов, что делает их перспективным направлением в научных и инженерных исследованиях [10]. Технология цифровых двойников активно развивается, обеспечивая новые возможности для анализа, прогнозирования и оптимизации как технических, так и биологических систем. ЦД могут использоваться как в промышленности, что представлено в работе [11], так и в сложных органических объектах [12]. Особый интерес представляют разработки в области использования цифровых двойников в сельском хозяйстве [13–15].

В [16] представлен ЦД в с/х производстве. Путем создания начальной цифровой среды для киберфизической системы агрономы могут лучше представлять состояние своих посевов и целесообразность использования различного оборудования и удобрений. ЦД может представлять собой инструмент для оптимизации производительности как соотношения между производством и потреблением ресурсов [17]. ЦД можно рассматривать как новую фазу интеллектуального развития и управления данными в садоводстве и в сельском хозяйстве в целом [18–20].

Метод расчета параметров посева

На каждой фазе развития на растения влияют факторы окружающей среды. Значения таких факторов на определенных фазах развития растения являются входными параметрами модели. Правила принятия решений для планирования переходов между состояниями стадий также индивидуальны для каждого сорта культуры.

На основе экспертных знаний агрономов выделены составы и значения входных и выходных параметров на разных фазах развития растения x_{ijk} и составлены трубки входных параметров. Трубкой параметров называются диапазоны изменения значений каждого фактора, влияющего на развитие растения. Наилучшие возможные значения параметров роста и развития растения на каждой фазе считаются оптимальными значениями.

На рис. 1 показан пример трубки входного параметра x и выходного параметра y , состоящей из четырех точек: 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 соответствующих им значений прироста выходных параметров Δy_{cr1}^{ijk} , y_{opt1}^{ijk} , y_{opt2}^{ijk} , Δy_{cr2}^{ijk} .

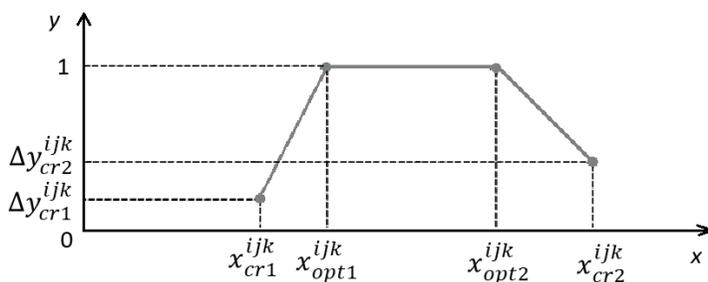


Рис. 1. Пример трубки входного параметра x и выходного параметра y

Модель состоит из набора фаз развития растения, которые включают набор трубок входных параметров. На основе описанной модели разработан метод расчета выходных параметров растения по фазам.

Перед расчетом значений выходных параметров необходимо определить длительность фаз растения – от этого зависит, какие дни относят к одной фазе, а какие к другой, так как влияние окружающей среды на растение на разных фазах его развития разнится. Базовая длительность рассчитывается по правилу суммы активных температур:

$$\text{duration}_{basei} = \sum_{j=1}^{\text{duration}_{\max}} d_j,$$

$$d_j = \begin{cases} 1, & \text{если } t_{\min} < t_j < t_{\max} \text{ и } t_{act(j-1)} + t_j < t_{act}, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где t_{act} – сумма активных температур; $t_{act(j-1)}$ – сумма активных температур за $j-1$ дней.

На базовую длительность фазы растения влияет предыдущее растение, росшее на месте растения модели, и входные параметры на фазе. Приращение (дельта) длительности i -ой фазы для k -го входного параметра находится следующим образом:

$$\Delta\text{duration}_{ik} = \begin{cases} \frac{(x_{ijk} - x_{cr1}^{ijk})(\Delta y_{opt1}^{ijk} - \Delta y_{cr1}^{ijk})}{x_{opt1}^{ijk} - x_{cr1}^{ijk}} + \Delta y_{cr1}^{ijk}, & \text{если } x_{cr1}^{ijk} \leq x_{ijk} < x_{opt1}^{ijk}, \\ \frac{(x_{ijk} - x_{opt1}^{ijk})(\Delta y_{opt2}^{ijk} - \Delta y_{opt1}^{ijk})}{x_{opt2}^{ijk} - x_{opt1}^{ijk}} + \Delta y_{opt1}^{ijk}, & \text{если } x_{opt1}^{ijk} \leq x_{ijk} < x_{opt2}^{ijk}, \\ \frac{(x_{ijk} - x_{opt2}^{ijk})(\Delta y_{cr2}^{ijk} - \Delta y_{opt2}^{ijk})}{x_{cr1}^{ijk} - x_{opt2}^{ijk}} + \Delta y_{opt2}^{ijk}, & \text{если } x_{opt2}^{ijk} \leq x_{ijk} < x_{cr2}^{ijk}, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Формула расчета итоговой дельты i -й фазы развития растения:

$$\text{duration}_i = \text{duration}_{basei} + \Delta\text{duration}_{ppi} + \frac{1}{k} \sum_{y=1}^k \Delta\text{duration}_{iky}.$$

Итоговая длительность должна быть между минимальной и максимальной длительностями:

$$\text{duration}_i = \begin{cases} \text{duration}_{\min}, & \text{если } \text{duration}_i < \text{duration}_{\min}, \\ \text{duration}_{\max}, & \text{если } \text{duration}_i > \text{duration}_{\max}, \\ \text{duration}_i, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Формула трубки параметров k -го выходного параметра на i -й стадии для l -го входного параметра на q -том интервале состояния растения:

$$\text{tubeItem}_{ik}^l = \left\{ \text{tubeItem}_{ik}^{lq} \right\}, \quad l = \overline{1, L}, \quad q = \overline{1, Q},$$

где L – количество входных параметров, влияющих на k -й выходной параметр на i -й стадии; Q – количество интервалов в трубке.

$$\text{tubeItem}_{ik}^{lq} = \left\{ \text{tubeBorder}_{ik}^{lq}, \text{tubeBorder}_{ik}^{l(q+1)}, \text{deltaOutValue}_{ik}^{lq} \right\},$$

$$\text{deltaOutValue}_{ik}^{lq} = \left\{ \text{deltaOutValue}_{ik}^{lqp} \right\}, p = \overline{1, P},$$

где P – количество интервалов длительности влияния.

Итоговое значение дельты выходного параметра для данной фазы есть сумма изменений этого параметра на интервалах непрерывного входа в интервал трубки. Прирост выходных параметров в пределах одного интервала трубки равен:

$$\Delta \text{out}_{is} = \frac{\text{deltaOutValue}_{ik}^{lq}}{\text{stageDuration}_i} \cdot \text{intervalDuration}_{is}; \Delta \text{out}_i = \sum \Delta \text{out}_{is}.$$

Алгоритм начинается с ввода значений входных параметров для всех фаз исходя из длительности фазы. На каждой фазе для каждого выходного параметра введенное значение сравнивается с соответствующей трубкой для этого входного параметра. Если значение превышает критические пределы трубки, растение погибает. Если нет, то происходит расчет дельты выходного параметра. Далее происходит расчет среднего значения дельты выходного параметра по всем входным параметрам. Затем вычисляется окончательное значение выходного параметра как сумма среднего значения выходного параметра и значения из предыдущей фазы. Полученные значения выходных параметров растения для каждой фазы добавляются в список.

Программное обеспечение ЦДПР

Описанный метод реализован в программном обеспечении, которое выполняет расчет выходных параметров растения, расчет длительности фаз роста и развития растения и создание файла таблицы с этими данными. Система разработана на языке Java 17 с использованием фреймворка Spring с использованием таких технологий, как Jackson Databind, Web Servlet, JUnit, а также на языке JavaScript с использованием фреймворка Vue.js, и функционирует под управлением операционных систем Windows 10 и выше.

Программное обеспечение содержит веб-интерфейс (рис. 2), позволяющий задать входные данные (температура воздуха, запас питательной влаги, относительная влажность воздуха и др.) и представить результаты вычислений (масса растения, урожайность, количество листьев и др.). Для стадий развития представлена диаграмма их длительностей, где отмечено их сокращение или увеличение относительно базовых значений и другие особенности для лучшего понимания пользователем результатов.

В самом верху пользовательского интерфейса представлены поля ввода, в которые пользователь должен ввести данные о посеве.

В поле «Загрузка таблицы со значениями входных параметров для расчета развития растения» необходимо выбрать файл таблицы формата xls, содержащий данные окружающей среды за весь период вегетации растения. Первый столбец содержит дату и время, в которые были взяты показания, и имеет формат {дд.мм.гггг чч:мм}. Седьмая строка содержит названия входных параметров, которые должны совпадать с названиями из модели. Значения температуры должны быть представлены за весь период развития растения.

В поле «Ввод даты посева» необходимо выбрать дату, в которую были посеяны семена растения.

В поле «Выбор названия предыдущего растения из списка» необходимо выбрать из выпадающего списка название предыдущего растения, росшего на поле, или выбрать отсутствие предшественника.

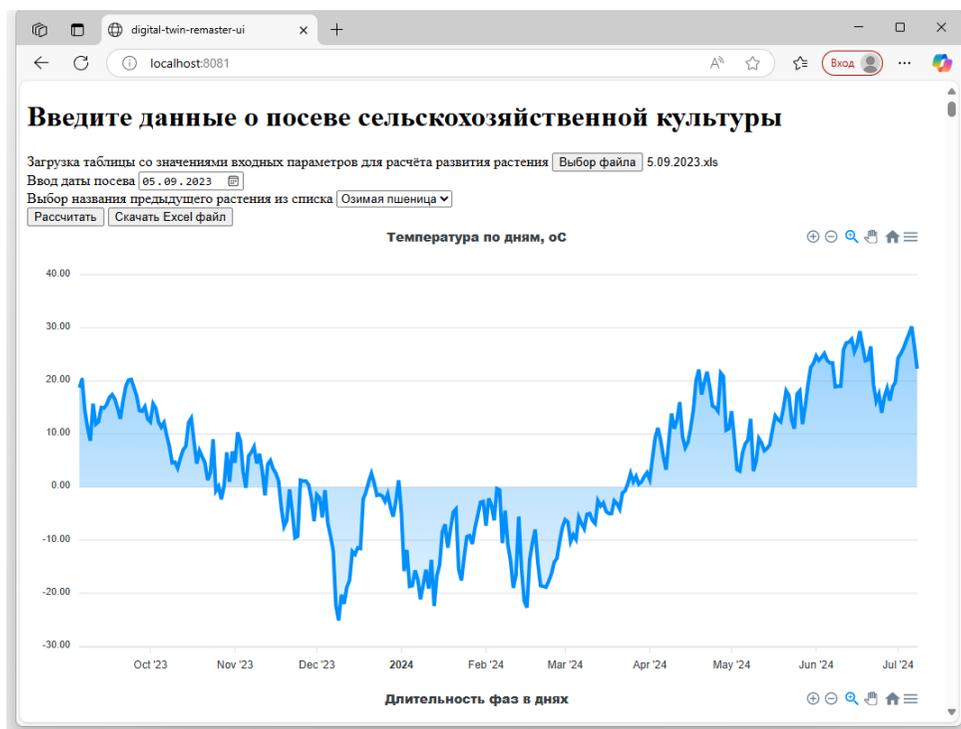


Рис. 2. Веб-интерфейс программы с диаграммой длительностей фаз

После нажатия на кнопку «Рассчитать» эти данные отправятся на сервер, после чего из полученных результатов построятся графики температуры, длительности, входных и выходных параметров.

На графике «Температура по дням» изображаются среднесуточные значения температуры за весь период вегетации растения, что позволяет пользователю ясно видеть колебания температуры, такие как резкое потепление или резкое похолодание, а также периоды жары и заморозков.

На рис. 3 изображен пример графика длительности фаз развития растения. На графике синим обозначена базовая длительность. Красным указана положительная «дельта длительности», то есть увеличение длительности фазы. Зеленым указана отрицательная «дельта длительности», то есть уменьшение длительности фазы.

Для каждого входного параметра представляется график, где отображаются значения трубки (см. пример на рис. 4). Зеленым обозначается оптимальное развитие растения. Для нормального развития растений значения входных параметров должны попадать в желтый диапазон, обозначающий рекомендуемые значения. При превышении рекомендуемых значений прогноз состояния урожая ухудшается. Если значения входных параметров превышают критические пределы, обозначенные красным цветом, то растение погибает.

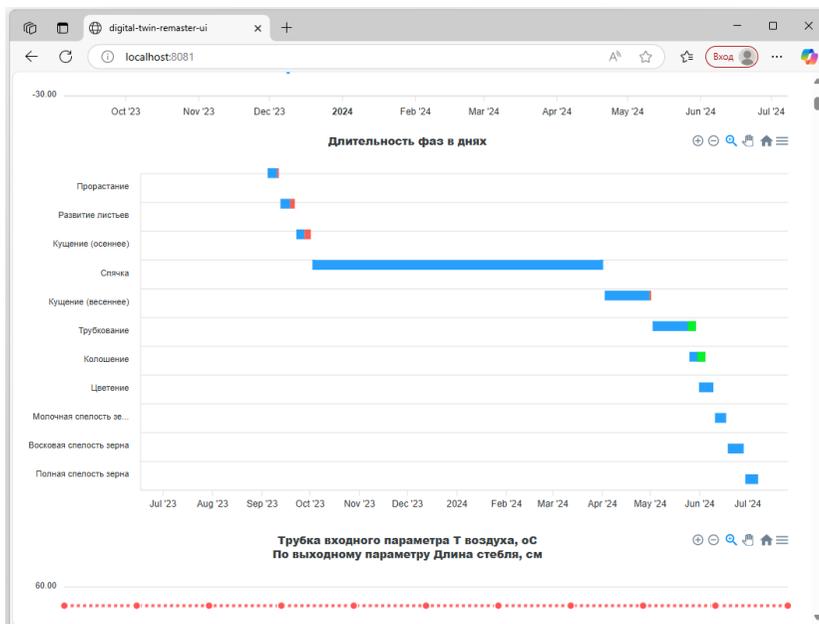


Рис. 3. График длительности фаз в днях

Пример графика выходного параметра представлен на рис. 5.

После расчета можно нажать на кнопку «Скачать Excel файл», и будет скачан файл с выходными значениями растения на фазах.

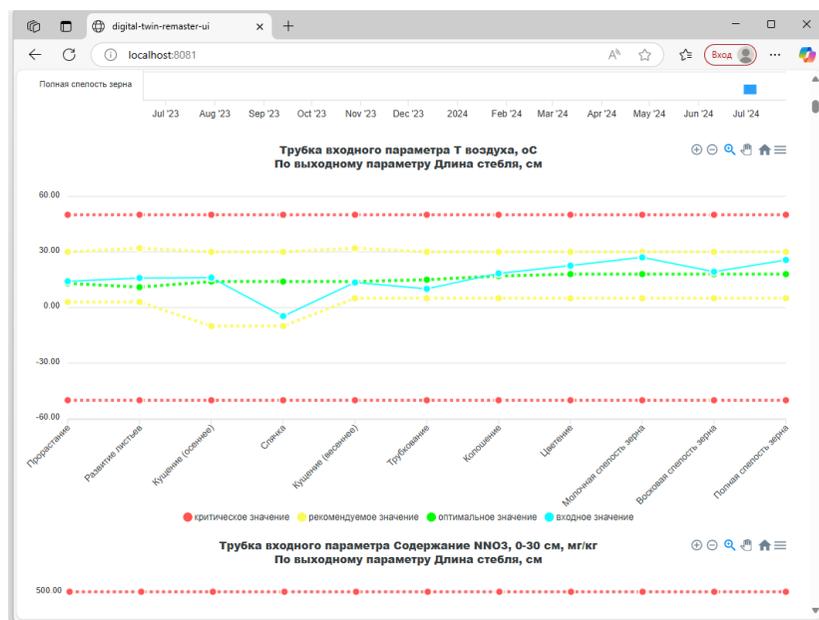


Рис. 4. Трубки входного параметра «температура воздуха» по выходному параметру «длина стебля»

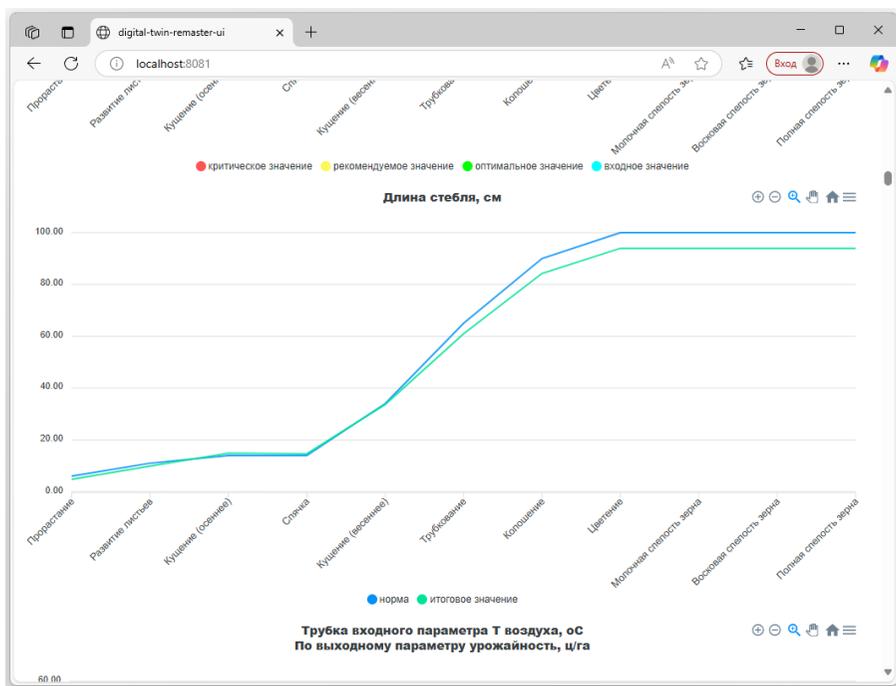


Рис. 5. График длины стебля

На рис. 6 представлена диаграмма, иллюстрирующая основные классы разрабатываемой системы.

Центральное место занимает класс «Модель», который отвечает за описание биологических процессов, связанных с ростом и развитием растения. Данный класс содержит список фаз развития растения, каждая из которых характеризуется уникальным номером, наименованием, перечнем выходных параметров и продолжительностью, выраженной в условных единицах. Каждый выходной параметр в рамках отдельной фазы связан с определенным набором входных параметров, оказывающих на него влияние. Эти взаимосвязи формализуются через трубки.

Классы, представленные в нижней части диаграммы, отражают структуру онтологии, которая загружается в систему в виде JSON-файла. Каждый такой файл содержит модель растения, относящуюся к конкретному сорту. Структура файла включает в себя последовательность фаз роста и развития, каждая из которых описана с учетом сортовых особенностей растения. Таким образом, количество фаз, их наименования, а также перечень входных и выходных параметров могут существенно различаться в зависимости от конкретного сорта. Для каждого сорта определяются собственные наборы параметров и логика их взаимодействия, что обеспечивает высокую степень гибкости и адаптивности системы при моделировании различных биологических объектов. Такая архитектура позволяет формировать точные и персонализированные цифровые модели, пригодные для анализа, прогнозирования и принятия решений в аграрной сфере.

В табл. 1 приведено описание основных классов.

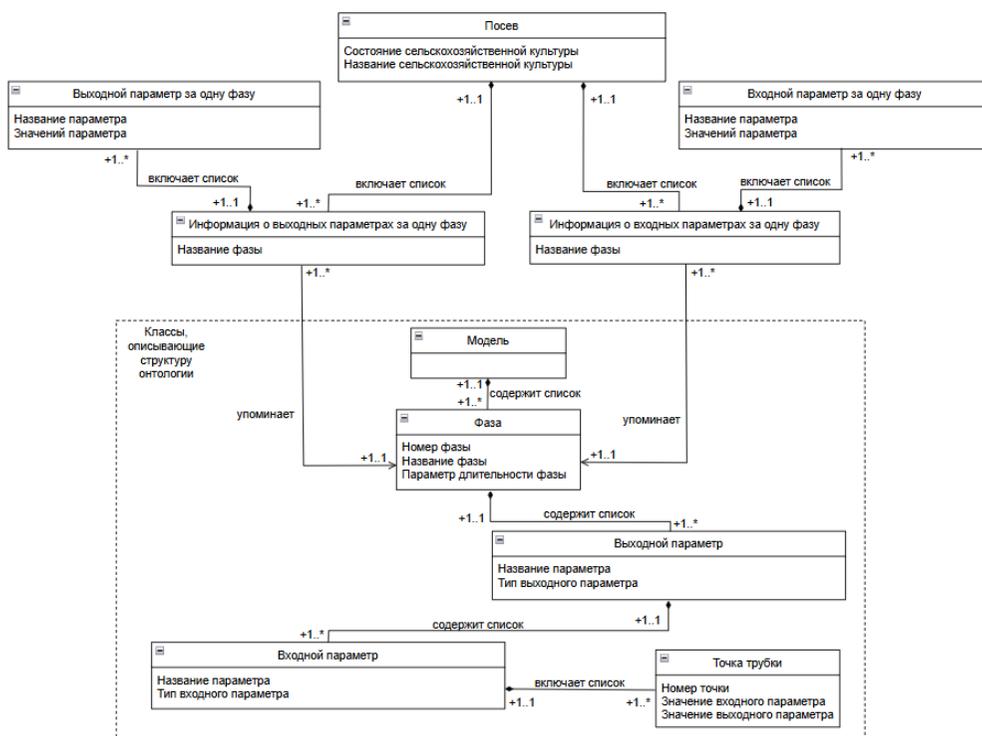


Рис. 6. Диаграмма основных классов системы

Таблица 1

Описание основных классов системы

Название класса	Назначение
Модель	Содержит список фаз развития растения
Фаза	Содержит сведения о фазе развития растения, в том числе список выходных параметров растения
Выходной параметр	Содержит сведения о выходном параметре растения, в том числе список входных параметров растения
Входной параметр	Содержит сведения о входном параметре растения, в том числе список значений трубки входного параметра и линейную функцию
Трубка	Содержит значение входного параметра и значение зависящего от него выходного параметра
Линейная функция	Содержит список точек трубки и метод получения значения выходного параметра растения, зависящие от входных параметров, введенных пользователем
Растение	Содержит список выходных и входных параметров

На рис. 7 представлена структурная схема системы.

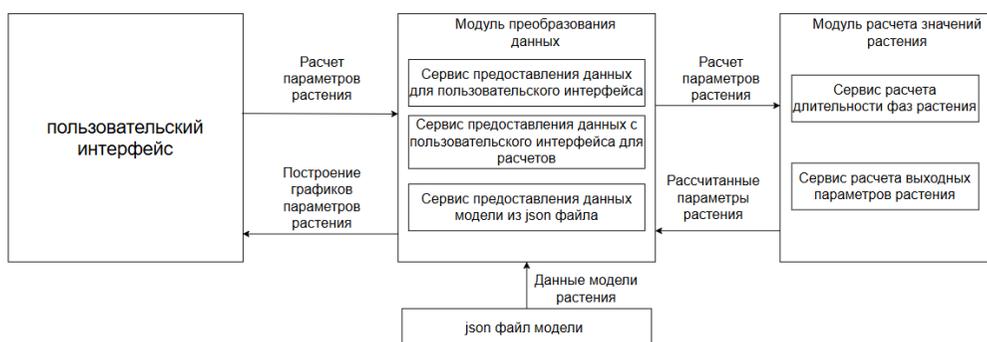


Рис. 7. Структурная схема системы

Разрабатываемая система состоит из следующих частей:

- 1) пользовательский интерфейс;
- 2) модуль преобразования данных, в состав которого входят:
 - сервис предоставления данных для пользовательского интерфейса;
 - сервис предоставления данных с пользовательского интерфейса для расчетов;
 - сервис предоставления данных модели из json файла;
- 3) модуль расчета значений растения:
 - сервис расчета длительности фаз растения;
 - сервис расчета выходных параметров растения.

Результаты моделирования

Для оценки качества и эффективности ЦДПР проведена проверка на здравый смысл: когда изменяются входные параметры среды и погоды по событиям – измеряется результат, т. е. план роста и развития посевов растений и прогноз урожайности, который должен в целом соответствовать требованиям, заложенным селекционерами в сорт.

Для моделирования использовались трубки входных параметров для культуры «озимая пшеница», полученные из лаборатории «Цифровые двойники растений СамНЦ РАН». Данные о фактическом состоянии погоды на тестовых полях на сезон были взяты из открытых источников¹. Для всех сценариев датой посева была взята фактическая дата посева с/х культуры «озимая пшеница» на полях Безенчукского района Самарской области. Также для всех сценариев было выбрано отсутствие растения-предшественника, росшего до этого на поле. В качестве выходных параметров рассмотрены высота растения и урожайность.

На основе созданного прототипа ЦДПР проведены эксперименты по моделированию событий при высокой температуре, низкой температуре, высокой влажности, низкой влажности, недостатке некоторых питательных веществ, а именно недостатке нитратов, недостатке оксида фосфора, недостатке оксида калия.

При сценарии фактических условий фактор «Температура воздуха» на всех стадиях колебался в границах рекомендуемого минимума и рекомендуемого максимума, остальные влияющие факторы также оставались в рамках рекомендуемых значений на всех фазах роста. Значение высоты растения на момент сбо-

¹ Данные о погоде. <https://tp5.ru/>.

ра урожая составило 95,5 см при оптимальном значении 100 см, а значение урожайности – 79,34 ц/га при оптимальном 80 ц/га. Значения при сценарии фактических условий близки к норме, так как входные значения окружающей среды были в рекомендованных границах.

Результаты моделирования сценариев избытка и недостаточности влаги. Была смоделирована высокая и низкая влажность воздуха и разные запасы питательной влаги на разной глубине в почве. На рис. 8–9 приведены результаты значений выходных параметров. При сценарии высокой влажности фактор «Относительная влажность воздуха» и фактор «Запас питательной влаги» на разной глубине на всех стадиях были выше своих оптимальных значений, но не выходили за рекомендованные границы; остальные влияющие факторы также оставались в рамках рекомендуемых значений на всех фазах роста. При сценарии низкой влажности фактор «Относительная влажность воздуха» и фактор «Запас питательной влаги» на разной глубине на всех стадиях были ниже своих оптимальных значений; остальные влияющие факторы также оставались в рамках рекомендуемых значений на всех фазах роста.

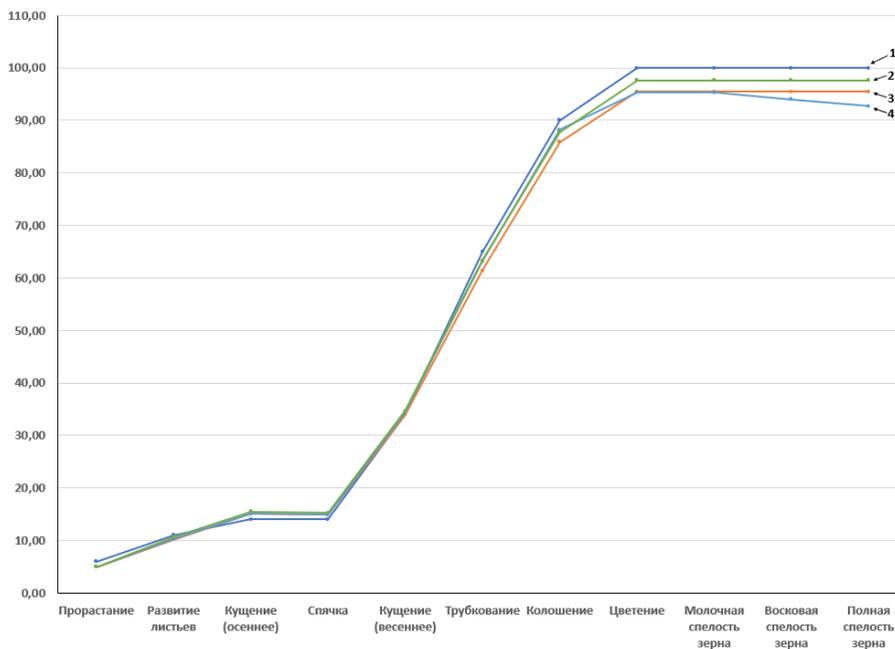


Рис. 8. Высота растения при высокой влажности для сценариев:

1 – оптимальные значения; 2 – значения при высокой влажности; 3 – значения при фактических условиях; 4 – значения при низкой влажности

Значения при сценарии высокой влажности, который моделирует ситуацию осадков и высокой влажности почвы, близки к оптимальным и фактическим значениям, так как с/х культура «озимая пшеница» растет в период с осени до лета следующего года, что показывает приспособленность данной культуры к осенним и зимним осадкам. Значения, полученные при сценарии низкой влажности, оказались ниже значений при фактических условиях, что подтверждается зависимостью данной культуры от влажности окружающей среды.

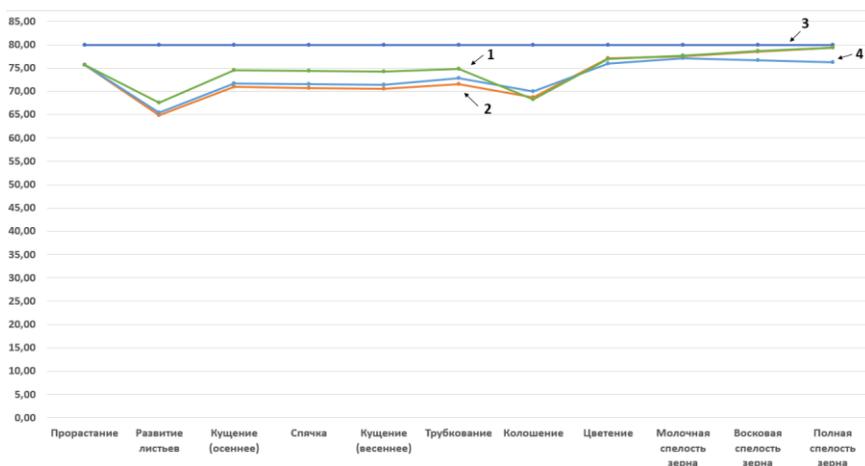


Рис. 9. Урожайность при высокой влажности для сценариев:
 1 – значения при высокой влажности; 2 – значения при фактических условиях;
 3 – оптимальные значения; 4 – значения при низкой влажности

Результаты моделирования сценариев высокой и низкой температуры.

Были смоделированы высокие и низкие температуры воздуха. На рис. 10–11 приведены значения выходных параметров. При сценарии высокой температуры фактор «Температура воздуха» на всех стадиях был выше своих оптимальных значений, остальные влияющие факторы оставались в рамках рекомендуемых значений на всех фазах роста. При сценарии низкой температуры фактор «Температура воздуха» на всех стадиях был ниже своих оптимальных значений, остальные влияющие факторы оставались в рамках рекомендуемых значений на всех фазах роста.

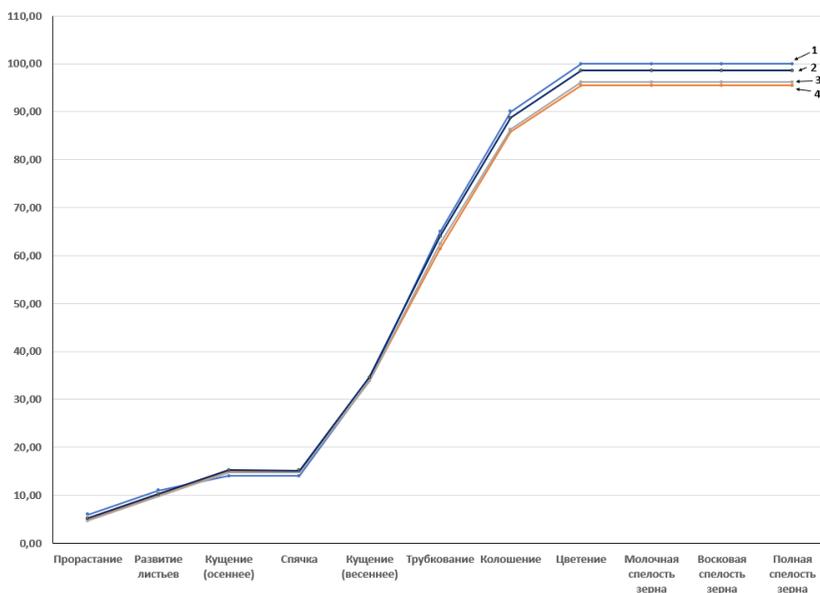


Рис. 10. Высота растения при высокой температуре для сценариев:
 1 – оптимальные значения; 2 – значения при низкой температуре; 3 – значения при высокой температуре; 4 – значения при фактических условиях

Значения при сценарии низкой температуры, который моделирует ситуацию похолодания, близки к оптимальным и фактическим значениям или выше них, так как с/х культура «озимая пшеница» растет в период низкой температуры, что показывает большую приспособленность данной культуры к таким сценариям. Значения, полученные при сценарии высокой температуры, оказались близки или ниже значений при фактических условиях, что подтверждается периодом вегетации данной культуры.

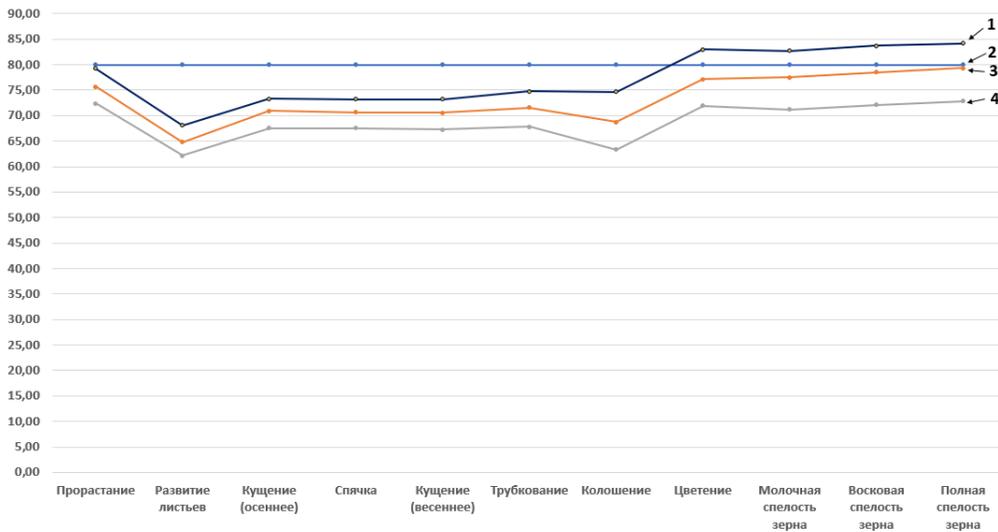


Рис. 11. Урожайность при высокой температуре для сценариев: 1 – значения при низкой температуре; 2 – оптимальные значения; 3 – значения при фактических условиях; 4 – значения при высокой температуре

Результаты моделирования сценариев недостатка некоторых питательных веществ. Смоделированы сценарии недостатка нитратов в почве, недостатка оксида фосфора в почве, недостатка оксида калия в почве. В табл. 2–3 приведены значения выходных параметров. При сценарии недостатка нитратов фактор «Запасы нитратов в слое, 0–30 см» на всех стадиях был ниже своих оптимальных значений, остальные влияющие факторы оставались в рамках рекомендуемых значений на всех фазах роста. При сценарии недостатка оксида фосфора фактор «Запасы оксида фосфора в слое, 0–30 см» на всех стадиях был ниже своих оптимальных значений, остальные влияющие факторы оставались в рамках рекомендуемых значений на всех фазах роста. При сценарии недостатка оксида калия фактор «Запасы оксида калия в слое, 0–30 см» на всех стадиях был ниже своих оптимальных значений, остальные влияющие факторы оставались в рамках рекомендуемых значений на всех фазах роста.

Значения при сценариях недостатка нитратов, недостатка оксида фосфора и недостатка оксида калия близки к оптимальным и фактическим значениям или выше них, что объясняется нахождением растения в стрессовых условиях, при которых некоторые параметры растения могут выше оптимальных значений.

Проведенные исследования показали, что разработанная модель адекватно реагирует на важные события и соответствует натурным данным. Это позволяет считать ее пригодной для практического применения агрономами и дальнейшего развития.

Таблица 2

Значения выходных параметров «Высота растения»

Название фазы	Значения выходного параметра «Высота растения», см				
	Оптимум	Фактические значения	Недостаток нитратов	Недостаток оксида фосфора	Недостаток оксида калия
Прорастание	6,00	4,96	5,21	5,21	5,21
Развитие листьев	11,00	10,12	10,29	10,29	10,29
Кущение (осеннее)	14,00	15,10	15,30	15,26	15,26
Спячка	14,00	14,88	15,08	15,04	15,04
Кущение (весеннее)	34,00	33,84	34,04	34,00	34,00
Трубкавание	65,00	61,44	61,83	61,66	61,66
Колошение	90,00	85,90	86,29	86,12	86,12
Цветение	100,00	95,50	95,90	95,72	95,72
Молочная спелость зерна	100,00	95,50	95,90	95,72	95,72
Восковая спелость зерна	100,00	95,50	95,90	95,72	95,72
Полная спелость зерна	100,00	95,50	95,90	95,72	95,72

Таблица 3

Значения выходных параметров «Урожайность»

Название фазы	Значения выходного параметра «Урожайность», ц/га				
	Оптимум	Фактические значения	Недостаток нитратов	Недостаток оксида фосфора	Недостаток оксида калия
Прорастание	80,00	75,68	75,93	75,93	75,93
Развитие листьев	80,00	64,81	68,81	68,81	68,81
Кущение (осеннее)	80,00	70,91	74,95	74,91	74,91
Спячка	80,00	70,69	74,72	74,69	74,69
Кущение (весеннее)	80,00	70,56	74,60	74,56	74,56
Трубкавание	80,00	71,53	75,46	75,39	75,39
Колошение	80,00	68,74	72,39	72,31	72,31
Цветение	80,00	77,14	80,81	80,71	80,71
Молочная спелость зерна	80,00	77,56	81,22	81,13	81,13
Восковая спелость зерна	80,00	78,54	81,92	81,83	81,83
Полная спелость зерна	80,00	79,34	82,62	82,48	82,48

Заключение

В работе предложен метод расчета параметров состояний растений, который может дополнять методы, основанные на нейронных сетях, и другие подходы.

В разработанном методе используется понятие «трубки» – диапазоны оптимальных и критических для выживания растений значений основных факторов, которые характеризуют фазы роста и развития растения и влияние входных параметров каждого интервала на выходные параметры растения. Разработанный метод был реализован в программном обеспечении, которое выполняет расчет выходных параметров растения, расчет длительности фаз роста и развития растения и создание файла таблицы с этими данными. Результаты моделирования на примере культуры «озимая пшеница» и сравнение процессов роста и развития при различных сценариях изменения окружающей среды показывают применимость такого подхода для моделирования процесса развития растений. Рассчитанные значения выходного параметра «Высота растения» при различных сценариях изменения окружающей среды были ниже оптимального значения. Значения выходного параметра «Урожайность» при различных сценариях были ниже, выше и равны оптимальному значению.

Такие результаты показывают сложность задачи моделирования процесса развития растения, зависящего от многих факторов.

Дальнейшие исследования предполагается направить на развитие и совершенствование метода расчета стадий и прогнозирования урожая, расширение базы знаний о сортах растений и разработку системы рекомендаций для фермеров, позволяющих оценивать возможные потери и выбирать методы и средства их снижения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фомин О.С., Зюкин Д.А., Беляев С.А., Репринцева Е.В.* Экономическая и географическая специфика осуществления экспорта российской пшеницы // Международный сельскохозяйственный журнал. 2023. № 2. С. 138–142. DOI: 10.55186/25876740_2023_66_2_138. EDN: WCNJAO.
2. *Страшная А.И., Тарасова Л.Л., Богомолова Н.А., Максименкова Т.А., Береза О.В.* Прогнозирование урожайности зерновых и зернобобовых культур в центральных черноземных областях на основе комплексирования наземных и спутниковых данных // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2015. № 353. С. 128–153.
3. *Раменская Е.В., Ермаков В.В., Кузнецов М.П.* Методы классификации гиперспектральных изображений при экологическом мониторинге // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 4–5. С. 990–992.
4. *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. Vol. 10, № 10. P. 1662–1689. DOI: 10.3390/math10101662. EDN: YKEBYK.
5. *Шевченко С.Н., Корчагин В.А., Горянин О.И.* Современные технологии возделывания озимой пшеницы в Средневолжском регионе // Земледелие. 2009. № 5. С. 40–41.
6. *Чечулин В.Л.* О простых математических моделях роста культурных растений // Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2018. № 1 (40). С. 46–50. DOI: 10.17072/1993-0550-2018-1-46-50. EDN: XMHXVB.
7. *Михайленко И.М.* Математическое моделирование роста растений на основе экспериментальных данных // Сельскохозяйственная биология. 2007. № 1. С. 103–111.
8. *Буховец А.Г., Семин Е.А., Бирючинская Т.Я., Горелова М.В.* Математические модели прогнозирования урожайности зерновых культур // Перспективы развития национальных агропродовольственных систем в условиях ВТО. 2014. С. 262.
9. *Саденова М.А., Храпов С.С., Бейсеменов Н.А.* Математическое моделирование прогноза урожайности сельскохозяйственных культур на основе данных полевого мониторинга и дистанционного зондирования // Математическая физика и компьютерное моделирование. 2023. Т. 26, № 3. С. 56–75. DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2023.3.5. EDN: XDMENM.

10. *Сосфенов Д.А.* Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2023. № 4. С. 35–43. DOI: 10.25198/2077-7175-2023-4-35. EDN: FKIQOC.
11. *Царев М.В., Андреев Ю.С.* Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 7. С. 517–531. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531. EDN: QOKQJW.
12. *Крамм М.Н., Безбородова О.Е., Бодин О.Н., Светлов А.В.* Цифровой двойник сердца // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1(35). С. 73–84. DOI: 10.21685/2307-5538-2021-1-9. EDN: VXMIJY.
13. *Purcell W., Neubauer T.* Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-art review // Smart Agricultural Technology. 2023. Vol. 3. P. 100094. DOI: 10.1016/j.atech.2022.100094. EDN: VCBRHX.
14. *García R., Aguilar J., Toro M., Pinto A., Rodríguez P.* A systematic literature review on the use of machine learning in precision livestock farming // Computers and Electronics in Agriculture. 2020. Vol. 179. P. 105826. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105826. EDN: YCUFBG.
15. *Verdouw C., Tekinerdogan B., Beulens A., Wolfert S.* Digital twins in smart farming // Agricultural Systems. 2021. Vol. 189. P. 103046. DOI: 10.1016/j.agsy.2020.103046. EDN: AVNZCL.
16. *Alves R.G., Souza G., Maia R.F., Tran A.L.H., Kamiński C., Soininen J.P., Aquino P.T., Lima F.* A Digital Twin for Smart Farming // 2019 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC). 2019. P. 1–4.
17. *Chaux J.D., Sanchez-Londono D., Barbieri G.* A Digital Twin Architecture to Optimize Productivity within Controlled Environment Agriculture // Applied Sciences. 2021. Vol. 11, № 19. P. 8875. DOI: 10.3390/app11198875. EDN: TGOLFU.
18. *Ariesen-Verschuur N., Verdouw C., Tekinerdogan B.* Digital Twins in greenhouse horticulture: A review // Computers and Electronics in Agriculture. 2022. Vol. 199. P. 107183. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107183. EDN: CGGQCE.
19. *Pylianidis C., Osinga S., Athanasiadis I.N.* Introducing digital twins to agriculture // Computers and Electronics in Agriculture. 2021. Vol. 184. P. 105942. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105942. EDN: EOMLEN.
20. *Jans-Singh M., Leeming K., Choudhary R., Girolami M.* Digital twin of an urban-integrated hydroponic farm // Data-Centric Engineering. 2020. Vol. 1. P. 20. DOI: 10.1017/dce.2020.21. EDN: OGKLF5.

Статья поступила в редакцию 03.07.2025

EXPERIMENTAL STUDIES OF MODELLING THE DEVELOPMENT OF AGRICULTURAL CROPS IN A DIGITAL TWIN OF PLANT CROPS

*P.O. Skobelev*¹, *A.A. Galuzin*²

¹Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

²Samara National Research University
34, Moskovskoe sh., Samara, 443086, Russian Federation

E-mail: petr.skobelev@gmail.com, alekseegaluzin@mail.ru

Abstract. *A method is proposed for calculating the output parameters of an agricultural crop in a digital twin of plant crops depending on weather conditions and resource constraints of the environment. The method is based on a model of "tubes" of input and output parameters of plant growth and development stages - ranges of values of the main environmental factors for each plant variety that are important for plant survival. These ranges are conventionally divided into three categories: optimal, in which the plant demonstrates the best development indicators; recommended, ensuring stable growth without significant stress; and critical, beyond which irreversible disturbances in the physiological processes of the plant are possible, including its death. The proposed calculation method based on the available data on weather conditions and available resources makes it possible to link the input and output parameters of the current stage and transfer the obtained results for calculating the next stage in order to build a final piecewise linear plan for plant growth and development and to forecast the yield and other plant parameters. The experiment provides an example of the proposed method for the agricultural crop "Winter wheat" under the actual scenario and alternative climate scenarios that model changes in weather conditions, and a comparison of the results of these scenarios with the values under actual conditions. The modeling results made it possible to estimate the sensitivity of the yield and plant height of winter wheat to various weather deviations. An assessment is made of the discrepancies identified for various scenarios, the results obtained are discussed, conclusions are formulated regarding the applicability of the proposed method for practical use in agricultural modeling, and directions for further research and development are presented.*

Keywords: *precision farming, digital twin, plant development, winter wheat, virtual model, modeling.*

REFERENCES

1. Fomin O.S., Zyukin D.A., Belyaev S.A., Reprinceva E.V. Ekonomicheskaya i geograficheskaya specifika osushchestvleniya eksporta rossijskoj pshenicy [Economic and geographical specifics of Russian wheat export] // Mezhdunarodnyj selskohozyajstvennyj zhurnal. 2023. № 2. P. 138–142. DOI: 10.55186/25876740_2023_66_2_138. (In Russian)
2. Strashnaya A.I., Tarasova L.L., Bogomolova N.A., Maksimenkova T.A., Bereza O.V. Prognozirovaniye urozhajnosti zernovyh i zernobobovyh kul'tur v central'nyh chernozemnyh oblastyah



© The Author(s), 2025

¹ Pyotr O. Skobelev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Dept. of Computer Science and Computer Engineering.

² Aleksey A. Galuzin, Master.

- na osnove kompleksirovaniya nazemnyh i sputnikovyh dannyh [Forecasting the yield of grain and leguminous crops in the central black earth regions based on the integration of ground-based and satellite data] // Trudy gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo centra Rossijskoj Federacii. 2015. № 353. P. 128–153. (In Russian)
3. *Ramenskaya E.V., Ermakov V.V., Kuznecov M.P.* Metody klassifikacii giperspek-tral'nyh izobrazhenij pri ekologicheskom monitoringe [Methods for classifying hyperspectral images in environmental monitoring] // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2016. V. 18, № 4–5. P. 990–992. (In Russian)
 4. *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. Vol. 10, № 10. P. 1662–1689. DOI: 10.3390/math10101662.
 5. *Shevchenko S.N., Korzhagin V.A., Goryanin O.I.* Sovremennye tekhnologii vozdeleyvaniya ozimoi pshenicy v Srednevolzhskom regione [Modern technologies for cultivating winter wheat in the Middle Volga region] // Zemledelie. 2009. № 5. P. 40–41. (In Russian)
 6. *Chechulin V.L.* O prostyh matematicheskikh modelyah rosta kul'turnyh rastenij // Vestnik Permskogo universiteta [On simple mathematical models of cultivated plant growth // Bulletin of Perm University]. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika. 2018. № 1(40). P. 46–50. DOI: 10.17072/1993-0550-2018-1-46-50. (In Russian)
 7. *Mihajlenko I.M.* Matematicheskoe modelirovanie rosta rastenij na osnove eksperimentalnyh dannyh [Mathematical modeling of plant growth based on experimental data] // Selsko-hozyajstvennaya biologiya. 2007. № 1. P. 103–111. (In Russian)
 8. *Buhovec A.G., Semin E.A., Biryuchinskaya T.Ya., Gorelova M.V.* Matematicheskie modeli prognozirovaniya urozhajnosti zernovyh kultur [Mathematical models for forecasting the yield of grain crops. Prospects for the development of national agro-food systems in the WTO] // Perspektivy razvitiya nacionalnyh agroproduktivnyh sistem v usloviyah VTO. 2014. P. 262. (In Russian)
 9. *Sadenova M.A., Hrapov S.S., Bejsekenov N.A.* Matematicheskoe modelirovanie prognoza urozhajnosti selskohozyajstvennyh kultur na osnove dannyh polevogo monitoringa i distancionnogo zondirovaniya [Mathematical modeling of agricultural crops productivity forecast based on field monitoring and remote sensing data] // Matematicheskaya fizika i kompyuternoe modelirovanie. 2023. V. 26, № 3. P. 56–75. DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2023.3.5. (In Russian)
 10. *Sosfenov D.A.* Cifrovoy dvojniki: istoriya vzniknoveniya i perspektivy razvitiya [Digital Twin: History of Origin and Development Prospects] // Intellekt. Innovacii. Investicii. 2023. № 4. P. 35–43. DOI: 10.25198/2077-7175-2023-4-35. (In Russian)
 11. *Carev M.V., Andreev Yu.S.* Cifrovye dvojniki v promyshlennosti: istoriya razvitiya, klassifikaciya, tekhnologii, scenarij ispolzovaniya [Digital twins in industry: history of development, classification, technologies, use scenarios] // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie. 2021. V. 64, № 7. P. 517–531. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531. (In Russian)
 12. *Kramm M.N., Bezborodova O.E., Bodin O.N., Svetlov A.V.* Cifrovoy dvojniki serdca [Digital twin of the heart] // Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol. 2021. № 1(35). P. 73–84. DOI: 10.21685/2307-5538-2021-1-9. (In Russian)
 13. *Purcell W., Neubauer T.* Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-art review // Smart Agricultural Technology. 2023. Vol. 3. P. 100094. DOI: 10.1016/j.atech.2022.100094. EDN: BCBRHX.
 14. *García R., Aguilar J., Toro M., Pinto A., Rodríguez P.* A systematic literature review on the use of machine learning in precision livestock farming // Computers and Electronics in Agriculture. 2020. Vol. 179. P. 105826. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105826. EDN: YCUFBG.
 15. *Verdouw C., Tekinerdogan B., Beulens A., Wolfert S.* Digital twins in smart farming // Agricultural Systems. 2021. Vol. 189. P. 103046. DOI: 10.1016/j.agsy.2020.103046.
 16. *Alves R.G., Souza G., Maia R.F., Tran A.L.H., Kamienski C., Soininen J.P., Aquino P.T., Lima F.* A Digital Twin for Smart Farming // 2019 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC). 2019. P. 1–4.
 17. *Chaux J.D., Sanchez-Londono D., Barbieri G.* A Digital Twin Architecture to Optimize Productivity within Controlled Environment Agriculture // Applied Sciences. 2021. Vol. 11, № 19. P. 8875. DOI: 10.3390/app11198875.

18. *Ariesen-Verschuur N., Verdouw C., Tekinerdogan B.* Digital Twins in greenhouse horticulture: A review // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 199. P. 107183. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107183.
19. *Pylianidis C., Osinga S., Athanasiadis I.N.* Introducing digital twins to agriculture // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 184. P. 105942. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105942.
20. *Jans-Singh M., Leeming K., Choudhary R., Girolami M.* Digital twin of an urban-integrated hydroponic farm // *Data-Centric Engineering*. 2020. Vol. 1. P. 20. DOI: 10.1017/dce.2020.21.

Original article submitted 03.07.2025