

И.М. Михайленко, доктор технических наук
 В.Н. Тимошин, кандидат технических наук
 Агрофизический научно-исследовательский институт
 РФ, 195220, Санкт-Петербург, Гражданский проспект, 14
 E-mail: ilya.mihailenko@yandex.ru

УДК 631.58.551.5

DOI: 10.30850/vrsn/2020/2/11-16

ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ В ТОЧНОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ*

В сельском хозяйстве заметно растет объем применения современных технологий, в том числе систем сбора, хранения и обработки данных. При этом увеличивается как объем данных, так и потребность в их качественной обработке и достоверных выводах, на которые можно полагаться принимая решения. Недостаток информации для принятия решений приводит к тому, что в процессе возделывания культур теряется до 40 % урожая. Дальнейшая автоматизация процессов всех этапов производственного цикла представляет собой более высокий уровень цифровой интеграции, который затрагивает сложнейшие организационные изменения в аграрном бизнесе, однако их реализация способна кардинально повлиять на прибыль и конкурентоспособность продукции. В основе модернизации аграрного сектора лежит переход к «интеллектуальному сельскому хозяйству». Наибольший интерес для науки и практики представляет интеллектуализация управления агротехнологиями, где основу составляют экспертные системы, в которых управляющие решения принимаются посредством баз знаний (БЗ), формируемых посредством аналитических систем управления, размещаемых в центрах обработки данных. В работе рассматриваются экспертные системы программного управления состоянием яровой пшеницы. К такому виду управления мы относим задачу предварительного формирования последовательности технологических операций в одном вегетационном периоде. В облачной информационной системе сформированные БЗ передаются из центра обработки данных на локальные системы управления по запросам потребителей.

Ключевые слова: облачные технологии, экспертные системы, программное управление агротехнологиями, модели и алгоритмы, точное земледелие.

I.M. Mikhailenko, *Grand PhD in Engineering sciences*
 V.N. Timoshin, *PhD in Engineering sciences*
 Agrophysical Research Institute
 RF, 195220, Sankt-Peterburg, Grazhdanskij prospekt, 14
 E-mail: ilya.mihailenko@yandex.ru

EXPERT SYSTEMS OF PROGRAM MANAGEMENT IN PRECISION FARMING

In agriculture, the volume and quality of the use of modern technologies, including systems for collecting, storing and processing data, is noticeably growing. This increases both the amount of data and the need for high-quality processing and reliable conclusions that you can rely on when making decisions. The lack of information for decision making leads to the fact that in the process of cultivating crops, up to 40 % of the crop is lost. Further automation of processes at all stages of the production cycle represents a higher level of digital integration, which affects the most complex organizational changes in the agricultural business, but their implementation can dramatically affect profit and competitiveness of products. The modernization of the agricultural sector is based on the transition to «intelligent agriculture». The greatest interest to science and practice is the intellectualization of agricultural technology management, where the basis is expert systems in which management decisions are made through knowledge bases (KB), formed through analytical control systems located in data centers. In this paper, we consider expert systems for the state control of spring wheat. To this type of management we attribute the task of preliminary formation of the sequence of technological operations on one growing season. In the cloud information system, the generated knowledge bases are transferred from the data center to local management systems at the request of consumers.

Key words: cloud technologies, expert systems, agro-technology management software, models and algorithms, precision farming.

Обладея одним из крупнейших в мире банков плодородных земель, по состоянию на начало 2019 года Россия занимала 15-е место по уровню цифровизации сельского хозяйства. Решения в точном земледелии применяют в 3 % хозяйств, в США эта цифра достигает 60, в странах Евросоюза – 80 %. В отрасли заметно растет объем и качественных технологий, в том числе систем сбора, хранения и обработки данных. Применяются данные со спутников, датчиков, из операционных и транзакционных систем. Увеличивается как объем данных, так и потребность в их

обработке и достоверных выводах, на которые можно полагаться, принимая решения. Недостаток информации для принятия решений приводит к тому, что в процессе выращивания, ухода за культурами теряется до 40 % урожая. Во время сбора урожая, хранения и транспортировки теряется еще 40 %. При этом, кроме погоды, большую часть факторов потерь можно контролировать с помощью автоматизированных систем управления. Дальнейшая автоматизация процессов всех этапов производственного цикла представляет более высокий уровень цифровой ин-

* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект №18-016-00008)./The study was partially supported by Russian Foundation of Basic Research (project №18-016-00008)

теграции, который затрагивает сложнейшие организационные изменения в бизнесе, однако их реализация способна кардинально повлиять на прибыль и конкурентоспособность продукции.

Для того, чтобы справиться с существующими и перспективными угрозами биологической и продовольственной безопасности, необходима аграрная экономика нового типа, основанная на использовании современных информационных технологий, соответствующая принципам устойчивого развития и модели безотходной (циркулярная) экономики. [5] В основе модернизации аграрного сектора лежит переход к «интеллектуальному сельскому хозяйству» — комплексная автоматизация и роботизация производства, использование автоматизированных систем принятий решений, современных технологий моделирования и проектирования экосистем. [4]

В работе [3] представлена общая концепция управления агротехнологиями, согласно которой задача управления включает в себя четыре уровня для разных масштабов времени. Первый уровень — управление севооборотами в годовом масштабе времени; второй, реализуемый в суточном масштабе времени на одном интервале вегетации, — программное управление; задачи третьего и четвертого уровней реализуются в реальном времени. В работе [2] рассматриваются экспертные системы стратегического управления.

Цель исследований — интеллектуализация следующего уровня управления — формирование программ управления агротехнологиями в одном вегетационном периоде.

Теоретическая основа программного управления состоянием яровой пшеницы

Фундаментальная основа для решения задач программного управления — математические модели, описывающие динамику параметров состояния объекта управления (ОУ). В нашем случае это сельскохозяйственное поле под посевом яровой пшеницы. [6–8] Рассматриваемый ОУ характеризуется, как континуальными параметрами состояния, к которым могут быть отнесены состояние биомассы посевов и почвенной среды, так и структурными фенофазами. Представим их (S) для яровой пшеницы в зависимости от суточного времени t :

- $\Sigma \cdot t \in (0-7), s = 1$ — посев;
- $\Sigma \cdot t \in (11-13), s = 2$ — всходы (1, 2, 3-й листы);
- $\Sigma \cdot t \in (21, 29), s = 3$ — кущение;
- $\Sigma \cdot t \in (30), s = 4$ — выход в трубку;
- $\Sigma \cdot t \in (31-32), s = 5$ — 1-е, 2-е междоузлие; t
- $\Sigma \cdot t \in (37), s = 6$ — флаговый лист;
- $\Sigma \cdot t \in (39), s = 7$ — язычок;
- $\Sigma \cdot t \in (49), s = 8$ — открытие листовой пазухи;
- $\Sigma \cdot t \in (51-59), s = 9$ — колошение;
- $\Sigma \cdot t \in (61-69), s = 10$ — цветение;
- $\Sigma \cdot t \in (71-75), s = 11$ — молочная спелость;
- $\Sigma \cdot t \in (85-86), s = 12$ — восковая спелость;
- $\Sigma \cdot t \geq 86, s = 13$ — полная спелость.

Весь период вегетации в зависимости от структуры биомассы посева может быть разделен на два интервала времени: со 2-й по 9-ю и с 9-й по 13-ю

фенофазы. Для первого модель динамики параметров структуры биомассы посева имеет следующий вид [3]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1m} \\ \dot{x}_{2m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} x(t)_{1m} \\ x(t)_{2m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} v_N(t) \\ v_K(t) \\ v_P(t) \\ v_{Mg}(t) \\ v_5(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix}, t \in (T_1, T_8), \quad (1)$$

где: x_{1m}, x_{2m} — средние по площади поля значения плотности биомассы посева (урожайность) и сырой массы, ц/га⁻¹ соответственно; внешние возмущения в обоих блоках — среднесуточные показатели: f_1, f_2, f_3 — температура воздушной среды, °C; радиация, Вт (м²·ч)⁻¹; интенсивность осадков, мм; параметры химического состояния почвы — содержание, кг/га⁻¹: v_N — азота, v_K — калия, v_P — фосфора, v_{Mg} — магния; v_5 — влагозапас, мм.

Для дальнейшего применения модель (1) представили в канонической символической форме, где все переменные объединим в векторы, а параметры — в соответствующие матрицы

$$\dot{X}_m = A_m X_m(t) + B_m V(t) + C_m F(t) \quad (2)$$

Для второго интервала времени модель динамики параметров структуры биомассы посева имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1u} \\ \dot{x}_{2u} \\ \dot{x}_{3u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}_u \begin{bmatrix} x(t)_{1u} \\ x(t)_{2u} \\ x(t)_{3u} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \end{bmatrix}_u \begin{bmatrix} v_N(t) \\ v_K(t) \\ v_P(t) \\ v_{Mg}(t) \\ v_5(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}_u \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix}, t \in (T_9, T_{13}), \quad (3)$$

где: x_{1u}, x_{2u}, x_{3u} — средние значения по площади поля — плотности биомассы посева; сырой массы; массы колосьев (урожая), ц/га⁻¹, соответственно; внешние возмущения в обоих блоках, среднесуточные показатели f_1, f_2, f_3 — температура воздушной среды, °C; уровень радиации, Вт (м²·ч)⁻¹; интенсивность осадков, мм; параметры химического состояния почвы содержание, кг/га⁻¹: v_N — азота, v_K — калия, v_P — фосфора; v_{Mg} — магния; v_5 — влагозапас, мм.

Каноническая векторно-матричная форма модели (3)

$$\dot{X}_u = A_u X_u(t) + B_u V(t) + C_u F(t). \quad (4)$$

Модель динамики параметров состояния почвы со 2-й по 9-ю фенофазу:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{v}_N \\ \dot{v}_K \\ \dot{v}_P \\ \dot{v}_{Mg} \\ \dot{v}_5 \end{bmatrix}_{2,9} &= \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & a_{15} \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & a_{25} \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & a_{35} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_N \\ v_K \\ v_P \\ v_{Mg} \\ v_5 \end{bmatrix} + \\
 &+ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{2,9} \begin{bmatrix} d_N(t) \\ d_K(t) \\ d_P(t) \\ d_{Mg}(t) \\ d_W(t) \end{bmatrix} + \\
 &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} \\ 0 & 0 & c_{23} \\ 0 & 0 & c_{33} \\ 0 & 0 & c_{43} \\ c_{51} & c_{52} & 1 \end{bmatrix}_{2,9} \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_{11} & 0 \\ m_{21} & 0 \\ m_{31} & 0 \\ m_{41} & 0 \\ m_{51} & m_{52} \end{bmatrix}_{2,9} \begin{bmatrix} x_{1m}(t) \\ x_{2m}(t) \end{bmatrix}, \quad (5)
 \end{aligned}$$

компактная форма:

$$\dot{V}_{29} = A_{29}V(t) + B_{29}D(T_3, T_9) + C_{29}F(t) - M_{29}X_m(t). \quad (6)$$

Модель параметров химического состояния почвы для фенофаз с 9-й по 13-ю:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{v}_N \\ \dot{v}_K \\ \dot{v}_P \\ \dot{v}_{Mg} \\ \dot{v}_5 \end{bmatrix}_{9,13} &= \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & a_{15} \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & a_{25} \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & a_{35} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} \end{bmatrix}_{9,13} \begin{bmatrix} v_N \\ v_K \\ v_P \\ v_{Mg} \\ v_5 \end{bmatrix} + \\
 &+ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{9,13} \begin{bmatrix} d_N(t) \\ d_K(t) \\ d_P(t) \\ d_{Mg}(t) \\ d_W(t) \end{bmatrix} + \\
 &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} \\ 0 & 0 & c_{23} \\ 0 & 0 & c_{33} \\ 0 & 0 & c_{43} \\ c_{51} & c_{52} & 1 \end{bmatrix}_{9,13} \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & m_{13} \\ m_{21} & 0 & m_{23} \\ m_{31} & 0 & m_{33} \\ m_{41} & 0 & m_{43} \\ m_{51} & m_{52} & 0 \end{bmatrix}_{9,13} \begin{bmatrix} x_{1u}(t) \\ x_{2u}(t) \\ x_{3u}(t) \end{bmatrix}, \quad (7)
 \end{aligned}$$

где: $d_P(t)$, $d_K(t)$, $d_N(t)$, $d_W(t)$ – доза внесения элементов питания, соответственно – фосфора, калия, кальция, азота и магния (кг/га^{-1}) и норма полива (мм); $a_{11}-a_{33}$, b_2-b_3 , c_1-c_3 – параметры модели, оцениваемые по экспериментальным данным; t – время.

Компактная векторно-матричная форма

$$\dot{V}_{9,13} = A_{9,13}V(t) + B_{9,13}D(t) + C_{9,13}F(t) - M_{9,13}X_u(t). \quad (8)$$

В соответствии с разработанной нами концепцией управления агротехнологиями рассматриваемая

задача решается в два этапа. [3] На первом, в качестве управляющих переменных рассматриваются параметры состояния почвы, программа их изменения находится во всем интервале вегетации, обеспечивая достижение поставленной цели управления. На втором этапе находятся последовательные технологические операции, контролирующие минимальное отклонение параметров почвы от оптимальной программы, полученной на первом этапе. Такая декомпозиция задачи программного управления существенно упрощает синтез оптимальных программ управления, учитывая тот факт, что почва, как среда, через которую реализуется управление, представляет собой самостоятельную сложную многомерную динамическую систему. Кроме того, результаты оптимизации на первом этапе позволяют оценить потенциальный уровень урожайности культуры.

По методике динамического программирования [1] задача первого этапа решается от конца вегетационного периода к его началу. Поэтому и цель управления в этой задаче заключается в получении заданной урожайности культуры в конце интервала вегетации, при выполнении условия получения заданной структуры всего биологического урожая, а именно, получение требуемого соотношения зерна и соломы и влажности зерна.

В обозначенных параметрах состояния формально цель управления выглядит следующим образом:

$$x_{1u}(T_{13}) \geq 2,1U^*, \quad x_{2u}(T_{13}) \leq 0,15U^*, \quad x_{3u}(T_{13}) \geq U^*,$$

где: U^* – заданная урожайность, ц/га^{-1} .

Представим критерий оптимальности, отвечающий поставленной цели для межвегетационного периода с 9-й по 13-ю фенофазу:

$$J_u(T_{13}) = [X_u(T_{13}) - X_u^*]^T G_u [X_u(T_{13}) - X_u^*], \quad (9)$$

где X^{*T} – вектор включающий, общую биомассу, сырую массу, массу зерна (урожай); G_u – весовая матрица массовых и качественных составляющих критерия.

В результате решения задачи управления мы получаем программу оптимального изменения состояния почвы, а также начальные условия параметров посева перед началом колошения – терминальные параметры состояния предшествующей фенологической фазы.

В соответствии со схемой принципа максимума [1], гамильтониан для системы (4) и критерия оптимальности (9) получим:

$$H_u = S_u^T (A_u X_u(t) + B_u V(t) + C_u F(t)) \quad (10)$$

где S_u – вектор сопряженных переменных – результат решения динамической системы:

$$\dot{S}_u = -\frac{dH_u}{dX_u} = -A_u^T S_u,$$

$$t \in (T_{15}, T_9), \quad S_u(T_{15}) = \frac{dJ_u(T_{15})}{dX_u}. \quad (11)$$

С учетом введенных обозначений пошаговый алгоритм решения задачи представляет собой следующую последовательность операций.

Шаг 0. Устанавливается календарное время начала T_9 и конца T_{15} межфазового периода формирования урожая. Задаются начальные условия: вектор параметров состояния посева $X_u(T_9)$ и начальная программа управления $V(t)=V_0$. Принимаются средние многолетние значения вектора климатических возмущений $F(T_9, T_{15})$. Задается минимальное значение критерия оптимальности (7), при котором алгоритм останавливается. Принимается циклическая переменная алгоритма $i = 0$.

Шаг 1. Решение системы

$$\dot{X}_{ui} = A_u X_{ui}(t) + B_u V_i(t) + C_u F(t)$$

в прямом времени – интервале $t \in (T_9, T_{15})$, дает векторный массив $X_{ui}(t)$.

Шаг 2. Решение системы

$$\dot{S}_{ui} = -\frac{\partial H_u}{\partial X_{ui}} = -A_u^T S_{ui},$$

$$t \in (T_{15}, T_9), S_{ui}(T_{15}) = \frac{dJ_u(T_{15})}{dX_{ui}} = 2G[X_{ui}(T_{15}) - X_u^*].$$

в обратном времени – интервале $t \in (T_{15}, T_9)$ векторный массив $S_{ui}(t)$ разворачивается во времени $S_{ui}(-t)$.

Шаг 3. Очередное приближение программы управления вектором параметров химического состояния почвы

$$V_{i+1}^*(t) = V_i^*(t) - g_i GR_i(t),$$

$$GR_i(t) = \frac{dH}{dV_i}(t) = B_u S_{ui}(t).$$

Шаг 4. Очередное приближение начальных условий на границе фенофаз

$$X_{ui+1}^*(T_9) = X_{ui}^*(T_9) - g_i S_{ui}(T_9).$$

Шаг 5. Переход циклической переменной $i = i + 1$ к п. 1, до выполнения условия $J_i(T_{15}) \leq \delta$.

Теперь подобная задача решается и в интервале, предшествующем фазе колошения.

Шаг 6. Конечные условия для межвегетационного периода $t \in (T_1, T_9)$ $X_m(T_9) = HX_{ui+1}^*(T_9)$, где

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} - \text{матрица связи.}$$

Шаг 7. Определение критерия оптимальности для межвегетационного периода с 1-й по 9-ю фенофазы

$$J(T_9) = [X_m(T_9) - HX_u^*(T_9)]^T G_m [X_m(T_9) - HX_u^*(T_9)],$$

$$G_m = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 \\ 0 & g_{22} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Шаг 8. Устанавливается календарное время начала T_1 и конца T_9 межфазового периода формирования урожая. Начальные условия: вектор параметров состояния посева $X_m(T_1)$ и начальная программа управления $V(t) = V_0$. Принимаются средние многолетние значения вектора климатических возмущений $F(T_1, T_9)$ и циклическая переменная $i = 0$.

Шаг 9. Решение системы:

$$\dot{X}_{mi} = A_m X_{mi}(t) + B_m V_i(t) + C_m F(t)$$

в прямом времени в интервале $t \in (T_1, T_9)$ дает векторный массив $X_{mi}(t)$.

Шаг 10. Решение системы:

$$\dot{S}_{mi} = -\frac{dH_m}{dX_{mi}} = -A_m^T S_{mi}, \quad t \in (T_9, T_1),$$

$$S_{mi}(T_9) = \frac{dJ_m(T_{13})}{dX_{mi}} = 2G[X_{mi}(T_9) - HX_u^*(T_9)].$$

В обратном времени, интервал $t \in (T_9, T_1)$, получается векторный массив $S_{mi}(-t)$, во времени $S_{mi}(t)$.

Шаг 11. Находится очередное приближение программы управления вектором параметров химического состояния почвы

$$V_{i+1}^*(t) = V_i^*(t) - g_i GR_i(t),$$

$$GR_i(t) = \frac{dH}{dV_i}(t) = B_m S_{mi}(t).$$

Шаг 12. Принимается циклическая переменная $i = i + 1$, осуществляется переход к п. 1 до выполнения условия $J_m(T_9) \leq \delta$.

В результате решения задачи первого этапа формируется оптимальная программа изменения параметров состояния почвы $V^*(t)$ на протяжении вегетации, а также программа потенциального развития посева $X^*(t)$, которая получается при включении оптимальной программы изменения параметров состояния почвы в модели параметров состояния посевов (2), (4).

Цель управления на втором этапе общего решения задачи: обеспечение наиболее близкого приближения к оптимальной программе изменения содержания элементов питания и влагосодержания в почве, полученной на первом этапе за счет независимого выбора размеров подкормок и поливов. Внесение удобрений и поливы проводят в фиксированные моменты времени наступления следующих фенологических фаз: $s = 3$ (кущение), $s = 9$ (колошение), $s = 10$ (цветение), $s = 10$ (молочная спелость).

Задача управления на этом этапе решается в двух интервалах времени: с 1-й по 9-ю и с 9-й по 13-ю фенофазу. Она заключается в нахождении последовательности векторов доз внесения удобрений и поливов по минимальным критериям:

$$J_{1,9} = \int_{T_1}^{T_9} [(V_{1,9}^*(t) - V_{1,9}(t))^T G(V_{1,9}^*(t) - V_{1,9}(t)) + C_D D(T_3, T_9)] dt, \quad (13)$$

$$J_{9,13} = \int_{T_9}^{T_{13}} [(V_{9,13}^*(t) - V_{9,13}(t))^T G(V_{9,13}^*(t) - V_{9,13}(t)) + C_D D(T_{10}, T_{11})] dt, \quad (14)$$

где C_D – вектор стоимостей единиц управления.

Гамильтонианы систем моделей (6),(8) и критериев (13),(14) имеют следующий вид

$$\begin{aligned} H_{1,9} = & [(V_{1,9}^*(t) - V_{1,9}(t))^T G(V_{1,9}(t) - \\ & - V_{1,9}(t)) + C_D D(T_3, T_9)] + \\ & + S_{1,9}^T [A_{1,9} V_{1,9}(t) + B_{1,9} D_i(T_3, T_9) + \\ & + C_{1,9} F(t) - M_{1,9} X_m^*(t)]. \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} H_{9,13} = & [(V_{9,13}^*(t) - V_{9,13}(t))^T G(V_{9,13}^*(t) - \\ & - V_{9,13}(t)) + C_D D(T_{10}, T_{11})] + \\ & + S_{9,13}^T [A_{9,13} V_{9,13}(t) + B_{9,13} D_i(T_{10}, T_{11}) + \\ & + C_{9,13} F(t) - M_{9,13} X_u^*(t)]. \end{aligned} \quad (16)$$

Обозначим алгоритм нахождения этих последовательностей.

Шаг 1. Задается циклическая переменная $i = 0$, начальное приближение последовательностей $D_{0,1,9i}^*(t) = \{D_{0i}(t_3), D_{0i}(t_9)\}$, $D_{0,10,11i}^*(t) = \{D_{0i}(t_{10}), D_{0i}(t_{11})\}$, средние многолетние значения климатических параметров $F(t)$, минимальное значение критериев оптимальности δ , при котором алгоритм останавливается.

Шаг 2. Для программы потенциального развития посева $X_m^*(t)$, полученной на первом этапе, в интервале $t \in (T_1, T_9)$ $V_{1,9,i}(T_2) = V_{1,9,0}$ решается система $\dot{V}_{1,9} = A_{1,9} V(t) + B_{1,9} D(T_2, T_9) + C_{1,9} F(t) - M_{1,9} X_m^*(t)$ в результате чего получают векторный массив $V_{1,9,i}(t)$.

Вычисляется критерий (13) до $J_{1,9,i} < \delta$.

Шаг 3. Для программы потенциального развития посева $X_m^*(t)$, полученной на первом этапе, в интервале $t \in (T_9, T_{13})$ $V_{9,13,i}(T_2) = V_{9,13,0}$ решается система $\dot{V}_{9,13} = A_{9,13} V(t) + B_{9,13} D(t) + C_{9,13} F(t) - M_{9,13} X_u^*(t)$.

В результате получают векторный массив $V_{9,13,i}(t)$. Критерий (14) вычисляется до $J_{9,13,i} < \delta$.

Шаг 4. Системы для сопряженных переменных:

$$\dot{S}_{1,9}(t) = -\frac{dH_{1,9}(t)}{dV_{1,9}} = -[2G(V_{1,9}^*(t) - V_{1,9}(t)) + A_{1,9}^T S_{1,9}(t)].$$

В обратном времени в интервале $t \in (T_9, T_1)$, $S_{1,9}(T_9) = 0$ получают векторный массив $S_{1,9}(t)$, который разворачивается во времени $S_{1,9}(-t)$;

$$\dot{S}_{9,13}(t) = -\frac{dH_{9,13}(t)}{dV_{9,13}} = -[2G(V_{9,13}^*(t) - V_{9,13}(t)) + A_{9,13}^T S_{9,13}(t)],$$

в обратном времени в интервале $t \in (T_{13}, T_9)$, $S_{9,13}(T_{13}) = 0$ получают векторный массив $S_{9,13}(t)$, который разворачивается во времени $S_{9,13}(-t)$.

Шаг 5. Находят очередные приближения векторов доз внесения удобрений и поливов $D^*(t)$

$$D_{ni+1}(T_3, T_9) = D_{ni}(T_3, T_9) - D_i^* \frac{dH_{1,9}(t)}{dD_{ni}(T_3, T_9)},$$

$$D_{ni+1}(T_3, T_9) = D_{ni}(T_3, T_9) - D_i^*(C_D + B_{1,9}^T S_{1,9}(T_3, T_9)),$$

если $D_{ni}(T_3, T_9) \in W_{3,9}$;

$$D_{ni+1}(T_3, T_9) = D_{ni}(T_3, T_9), \text{ если } D_{ni+1}(T_3, T_9) \notin W_{3,9};$$

Вычисляют критерий оптимальности $J_{1,9}$, если условие $J_{1,9} \leq \delta$ не выполняется, то переходят к шагу 2.

$$D_{ni+1}(T_9, T_{10}) = D_{ni}(T_9, T_{10}) - D_i^* \frac{dH_{9,13}(t)}{dD_{ni}(T_9, T_{10})},$$

$$D_{ni+1}(T_9, T_{10}) = D_{ni}(T_9, T_{10}) - D_i^*(C_D + B_{9,13}^T S_{9,13}(T_9, T_{10})),$$

если $D_{ni}(T_9, T_{10}) \in W_{9,10}$;

$$D_{ni+1}(T_9, T_{10}) = D_{ni}(T_9, T_{10}), \text{ если } D_{ni+1}(T_9, T_{10}) \notin W_{9,10};$$

Рассчитывают критерий оптимальности $J_{9,13}$, если условие $J_{9,13} \leq \delta$ не выполняется, то переходят к шагу 3.

Интеллектуализация программного управления

Как было представлено в работах [2, 4], интеллектуализация любого вида управления агротехнологиями заключается в переходе к экспертным системам, в которых выбор оптимальных программ управления осуществляется на основе базы знаний (БЗ). Такая БЗ формируется для различных вариантов условий решения задачи, а число таких вариантов должно равномерно заполнять всю область возможных значений условий. В рассматриваемой задаче в набор условий входят вектор начальных значений элементов питания и водозапаса почвы V_0 , а также многомерная область ограничений на технологические воздействия Ω . Формируется БЗ путем многократного решения задачи программного управления при реализации, приведенного выше алгоритма. Для апробации этого подхода мы сформировали БЗ для 50-ти различных вариантов условий. На рис. 1, (4-я стр. обл.) приведена оптимальная последовательность технологических операций для средних значений условий по БЗ (табл. 1).

Данным условиям соответствует значение критерия оптимальности (14) равное 28,52, что эквивалентно потерям урожая 5,34 ц/га⁻¹.

Для апробации принципа интеллектуализации управления были сформированы запросы на централизованную БЗ от локальных систем управления. В первом случае локальные условия расположены в области максимальных отклонений условий от средних значений, приведенных в табл. 1.

На запрос в БЗ выбран наиболее близкий по условиям вариант. На рис. 2, (4-я стр. обл.) представлена оптимальная программа, соответствующая этим условиям. Значение критерия оптимальности (14) для этого варианта 21,29, что эквивалентно потере урожая 1,8 ц/га⁻¹.

Во втором случае локальные условия были расположены в области минимальных отклонений условий от средних значений, приведенных в табл. 1.

Оптимальная программа, соответствующая наиболее близкому варианту из БЗ отражена на рис. 3 (4-я стр. обл.). Значение критерия оптимальности (14) – 37,12, что эквивалентно потере урожая 6,1 ц/га⁻¹.

Проверочные прямые расчеты оптимальных программ для запрошенных условий показали, что ошибка выбора оптимальной программы по БЗ укладывается в интервал 10...20 %. Уменьшение

Таблица 1.

Исходные данные для расчета средней по БЗ программы управления

Начальные значения параметров почвы	Азот, кг/га ⁻¹	Калий, кг/га ⁻¹	Фосфор, кг/га ⁻¹	Магний, кг/га ⁻¹	Влагозапас, мм
		32	27	19	12,5
Ограничения доз внесения и норм поливов	D_{N^*} кг/га ⁻¹	D_{K^*} кг/га ⁻¹	D_{P^*} кг/га ⁻¹	D_{Mg^*} кг/га ⁻¹	D_{W^*} т/га ⁻¹
Кущение	15	5	10	5	50
Колошение	40	20	30	35	120
Цветение	60	50	50	60	250
Молочная спелость	80	80	80	80	300

Таблица 2.

Запрос локальной АСУ АТ из области максимальных отклонений условий от средних значений по БЗ

Начальные значения параметров почвы	Азот, кг/га ⁻¹	Калий, кг/га ⁻¹	Фосфор, кг/га ⁻¹	Магний, кг/га ⁻¹	Влагозапас, мм
		32,3	25,7	19,9	11,9
Ограничения доз внесения и норм поливов	D_{N^*} кг/га ⁻¹	D_{K^*} кг/га ⁻¹	D_{P^*} кг/га ⁻¹	D_{Mg^*} кг/га ⁻¹	D_{W^*} т/га ⁻¹
Кущение	19	6	12	6	63
Колошение	50	25	38	44	152
Цветение	76	63	63	76	317
Молочная спелость	100	100	100	100	381

Таблица 3.

Запрос локальной АСУ АТ из области минимальных отклонений условий от средних значений по БЗ

Начальные значения параметров почвы	Азот, кг/га ⁻¹	Калий, кг/га ⁻¹	Фосфор, кг/га ⁻¹	Магний, кг/га ⁻¹	Влагозапас, мм
		18,8	14,9	11,6	6,9
Ограничения доз внесения и норм поливов	D_{N^*} кг/га ⁻¹	D_{K^*} кг/га ⁻¹	D_{P^*} кг/га ⁻¹	D_{Mg^*} кг/га ⁻¹	D_{W^*} т/га ⁻¹
Кущение	11	3	7	3	37
Колошение	29	14	22	25	88
Цветение	44	37	37	44	185
Молочная спелость	50	50	50	50	220

этих ошибок возможно, если увеличить размерность БЗ и ее сегментацию по зонам климатических условий.

ВЫВОДЫ

Предложены методика и алгоритмы формирования оптимальных программ управления состоянием яровой пшеницы для использования в облачных информационных системах. При этом из облака на локальные автоматизированные системы программного управления передается база знаний (БЗ), посредством которой выбирают наиболее близкие оптимальные программы внесения минеральных удобрений и поливов в течение вегетационного периода. Для формирования БЗ облака разработаны

алгоритмы формирования оптимальных программ, минимизирующие риски потерь урожая яровой пшеницы. Методика и алгоритмы могут быть распространены и на другие зерновые культуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Казаков, И.Е. Методы оптимизации стохастических систем / И.Е. Казаков. – М.: Наука, 1987. – 349 с.
2. Михайленко, И.М. Экспертные системы стратегического управления в точном земледелии / И.М. Михайленко, В.Н. Тимошин // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2019. – № 5. – С. 4–7.
3. Михайленко, И.М. Теоретические основы и техническая реализация управления агротехнологиями / И.М. Михайленко. – Изд. СПбГТУ. – 2017. – 250 с.
4. Михайленко, И.М. Интеллектуализация управления агротехнологиями / И.М. Михайленко // Вестник российской сельскохозяйственной науки. – 2019. – № 2. – С. 24–28.
5. Точное сельское хозяйство (Precision Agriculture) / под ред. Д. Шпаара, А.В. Захаренко, В.П. Якушева. – СПб.: ВИЗР, 2009. – 397 с.
6. Derby, N.E. Comparison of nitrogen management zone delineation methods for corn grain yield/ N.E. Derby, F.X.M. Casey, D.E. Franzen // Agronomy Journal. – 2007. – No. 99. – PP. 405–414.
7. Roudier, P. A technical opportunity index adapted to zone-specific management/ P. Roudier, B. Tisseyre, H. Poilve, J.-M. Roger // Precision Agriculture. – 2011. – Vol. 12. – PP. 130–145.
8. Kim, K. Technological change and risk management: An application to the economics of corn production / K. Kim, J. P. Chavas // Agricultural Economics. – 2003. – No. 29. – PP. 125–142.

LIST OF SOURCES

1. Kazakov, I.E. Metody` optimizacii stoxasticheskikh system / I.E. Kazakov. – M.: 1987, Nauka. – 349 s.
2. Mikhaylenko, I.M. Ekspertnyye sistemy strategicheskogo upravleniya v tochnom zemledelii / I.M. Mikhaylenko, V.N. Timoshin // Vestnikrossiyskoysel'skokhozyaystvennoy nauki. – 2019. – No. 5. – S. 4–7.
3. Mikhaylenko, I.M. Teoreticheskiye osnovy itekhnicheskaya realizatsiya upravleniya agrotekhnologiyami / I.M. Mikhaylenko. – Izd. SpbGTU. – 2017. – 250 s.
4. Mikhaylenko, I.M. Intellectualizatsiya upravleniya agrotekhnologiyami / I.M. Mikhaylenko // Vestnik rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki. – 2019. – № 2. – S. 24–28.
5. Tochnoyesel'skoyekhozyaystvo (Precision Agriculture) / pod red. D. Shpaara, A.V. Zakharenko, V.P. Yakusheva. – SPb.: VIZR, 2009. – 397 s.
6. Derby, N.E. Comparison of nitrogen management zone delineation methods for corn grain yield / N.E. Derby, F.X.M. Casey, D.E. Franzen // Agronomy Journal. – 2007. – No. 99. – PP. 405–414.
7. Roudier, P. A technical opportunity index adapted to zone-specific management / P. Roudier, B. Tisseyre, H. Poilve, J.-M. Roger // Precision Agriculture. – 2011. – Vol. 12. – PP. 130–145.
8. Kim, K. Technological change and risk management: An application to the economics of corn production / K. Kim, J.P. Chavas // Agricultural Economics. – 2003. – No. 29. – PP. 125–142.