

И.М. Михайленко, доктор технических наук

В.П. Якушев, академик РАН

Агрофизический научно-исследовательский институт  
РФ, 195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский проспект, 14  
E-mail: ilya.mihailenko@yandex.ru

УДК 63.631.1

DOI: 10.30850/vrsn/2022/2/4-11

**ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ АГРОТЕХНОЛОГИЯМИ\***

*Цифровизация и интеллектуализация в настоящее время стали факторами ускоренного развития современного сельского хозяйства. При этом ведущий фактор – интеллектуализация управления, которая всегда направлена на замену человека в контуре управления сложными объектами, в том числе агротехнологиями. Это влечет за собой существенное усложнение самих интеллектуальных систем управления (ИСУ). В работе представлено одно из направлений интеллектуализации, основанное на облачных информационных технологиях. Особое внимание уделяется практической реализуемости ИСУ с учетом недостаточной квалификации кадров, эксплуатирующих эти системы в производственных условиях. Предлагается повсеместное применение экспертных ИСУ, в которых базы знаний (БЗ) формируются посредством аналитических систем управления, используемых в качестве «идеального учителя», в региональных центрах обработки данных, хранятся в облачных информационно-технических системах и передаются локальным ИСУ по их запросам. Цель работы – обоснование структуры информационно-технической базы интеллектуализации управления агротехнологиями, обеспечивающей наибольшую эффективность ИСУ, при минимальных затратах средств на их реализацию. Представлен эскиз проекта Регионального центра информационного обслуживания экспертных систем управления агротехнологиями (РЦИО ЭСУА).*

**Ключевые слова:** интеллектуализация, системы управления, облачные технологии, экспертные системы управления, базы знаний, алгоритмы управления.

I.M. Mikhaylenko, *Grand PhD in Engineering sciences*V.P. Yakushev, *Academician of the RAS*

Agrophysical Research Institute

RF, 195220, g. Sankt-Peterburg, Grazhdanskij pr., 14

E-mail: ilya.mihailenko@yandex.ru

**INFORMATION TECHNOLOGY BASE  
OF INTELLECTUALIZATION OF AGROTECHNOLOGY MANAGEMENT**

*Digitalization and intellectualization have now become factors in the accelerated development of modern agriculture. At the same time, the leading factor is the management intellectualization, which is always aimed at replacing a person in the control loop of complex objects, including agricultural technologies. This entails a significant complication of the intelligent control systems (IMS) themselves. The paper presents one of the areas of intellectualization based on cloud information technologies. Particular attention is paid to the IMS practical feasibility, taking into account the insufficient qualifications of personnel operating these systems in production conditions. The widespread usage of expert MIS is proposed, in which knowledge bases (KB) are formed by means of analytical management systems used as an “ideal teacher” in regional data processing centers, stored in cloud information systems and transferred to local MIS at their request. The purpose of the work is to substantiate the structure of the information and technical base for the intellectualization of the agricultural technologies management, which ensures the greatest efficiency of the IMS, with the minimum cost of funds for their implementation. A sketch of the project of the Regional Information Service Center for Expert Systems for Agricultural Technology Management (RCIO ESUA) is presented.*

**Keywords:** intellectualization, control systems, cloud technologies, expert control systems, knowledge bases, control algorithms.

Для выхода на лидирующие позиции в мире отечественному сельскому хозяйству необходим переход на прорывные направления развития с использованием современных информационных технологий (ИТ). Эффективная база для устойчивого развития отрасли – ее цифровая трансформация. За счет получения и обработки больших объемов данных появляется возможность поступления ценной актуальной информации в производственный процесс и использования ее для соответствующей оптимизации. [1, 2] В академических институтах РФ формируется единая концепция цифровизации сельского хозяйства России, которая предполагает развитие основных направлений [3, 10]:

**Цифровые технологии в управлении АПК.** Создание и внедрение аналитических инструментов и специализированных баз данных для программного, аппаратного и информационного обеспечения управления АПК.

**«Умное» землепользование.** Разработка интеллектуальной системы планирования и оптимизации агроландшафтов, использования земель в сельскохозяйственном производстве на разных уровнях обобщения (поле, хозяйство, муниципалитет, субъект РФ, страна, зарубежные территории), функционирующей на основе цифровых, дистанционных, геоинформационных технологиях и методов компьютерного моделирования.

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-29-05184 / The work was supported by RFBR grant No. 19-29-05184.

**«Умное» поле.** Гарантия стабильного роста производства сельскохозяйственной продукции растениеводства с помощью цифровых технологий сбора, обработки и применения массива данных о состоянии почв, растений и окружающей среды.

**«Умный» сад.** Оцифрованная информация в единой геоинформационной системе о не менее 90 % площадей многолетних насаждений. Обеспечение средствами сбора данных о состоянии почв, растений и окружающей среды не менее 70 % площадей промышленных садов. Не менее половины площадей промышленных садов должны быть покрыты сетью передачи данных для возможности сбора Больших Данных. Оснащение системами мониторинга и включение в единую геоинформационную систему более 70 % мобильных технических средств (не менее 30 % будут роботизированными).

**«Умная» теплица.** Разработка современной комплексной технологии, базирующейся на применении интернета вещей для производства продуктов питания, получение высококонкурентных субстратов и удобрений, отечественных инновационных систем (микроклимат, освещение, эффективное энергоснабжение, универсальный модуль, питание, автономность и другое) для закрытого грунта, методов контроля качества продукции, увеличения питательной ценности овощей.

**«Умная» ферма.** Создание цифровых технологий, обеспечивающих независимость и конкурентоспособность отечественного животноводческого комплекса: повышение молочной продуктивности животных до 13 000 л/год; снижение уровня заболеваемости коров; автономное производство (без оператора); энергоэффективность и энергомобильность; безопасные и качественные продукты питания, в том числе функциональные.

**Сквозные технологии и формирование исследовательских компетенций.** Минсельхозу России в сотрудничестве с Минобрнауки России и РАН целесообразно создать отраслевую платформу, которая обеспечит обсуждение задач по развитию цифровизации АПК, проведение и координацию исследовательских и образовательных программ, осуществление пилотных и бизнес-проектов. Необходимо развивать сквозные технологии: интернет вещей; RFID-технологии; нейронные сети; Большие Данные; искусственный интеллект; новые производственные технологии; сенсорика и компоненты робототехники; технологии Blockchain, а также бесконтактные и дистанционные.

Интеллектуализация превращает сельское хозяйство в сектор с очень интенсивным потоком данных. Информация поступает от различных устройств, расположенных в поле и на ферме, датчиков агротехники, метеорологических станций, дронов, спутников, внешних систем, партнерских платформ, поставщиков. Общие данные от участников производственной цепочки, собранные в одном месте, позволяют получать информацию нового качества, находить закономерности, создавать добавочную стоимость, применять современные научные методы обработки (data science) и на их основе принимать правильные решения, минимизирующие риски. Интеллектуализация всегда направлена на замену человека в контуре управления сложными объектами, к которым,

несомненно, относятся и агротехнологии. В свою очередь усложняет сами интеллектуальные системы управления (ИСУ).

Рассмотрено одно из направлений интеллектуализации управления агротехнологиями, основанное на использовании облачных информационных технологий. [3-6, 8, 16, 17] Особое внимание уделено возможности практической реализации систем автоматизированного управления с учетом кадровой проблемы.

Цель работы – обоснование структуры информационно-технической базы интеллектуализации управления агротехнологиями, обеспечивающей наибольшую эффективность ИСУ, при минимальных затратах средств на их реализацию.

**Системный подход к задаче интеллектуализации управления агротехнологиями.** Исходная база цифровизации и интеллектуализации отрасли сельского хозяйства обеспечена научно-техническим прогрессом XX и начала XXI веков, который предоставил новые возможности уменьшения риска сельскохозяйственного производства: роботизированные машины; средства измерения; вычислительную технику и современную математическую базу. Быстрое развитие информационных технологий помогло исследователям и разработчикам соединить в единый управляемый комплекс средства измерения различной физической природы с вычислительной техникой и автоматизированными сельскохозяйственными машинами. Было разработано новое аграрно-технологическое направление – «точное земледелие» или «точное сельское хозяйство». Точное земледелие (ТЗ) подразумевает повышение управляемости растениеводства путем решения комплекса задач управления агротехнологиями. По способу решения задачи делятся на две группы [9]:

- организационного управления, решаемые менеджментом различного уровня с помощью системы поддержки принятия решений (СППР);
- управления агротехнологиями автоматизированными системами (АСУАТ).

Интеллектуализация процесса в обеих группах зависит от степени участия в нем самого человека, что в свою очередь обусловлено научно-техническим уровнем проектов СППР и АСУАТ. [3, 17] Эти системы во многом схожи по своей организации: имеют одинаковые наборы средств измерения, оценивания параметров состояния объектов (систем) и идентификации математических моделей (рис. 1). Различие – в алгоритмах принятия решений и способе реализации воздействий на объекты управления. В СППР выбираются наилучшие варианты из нескольких возможных альтернатив, исполнитель – менеджмент хозяйств. В АСУАТ осуществляются классические процедуры поиска оптимальных технологических воздействий на различных уровнях управления.

В СППР и АСУАТ с аналитическими блоками управления решения принимаются на основе процедур минимизации критериев оптимальности, отражающих принятую цель управления.

Для этого необходимо реализовать много измерительных и вычислительных действий: верификация измерительной информации; идентификация

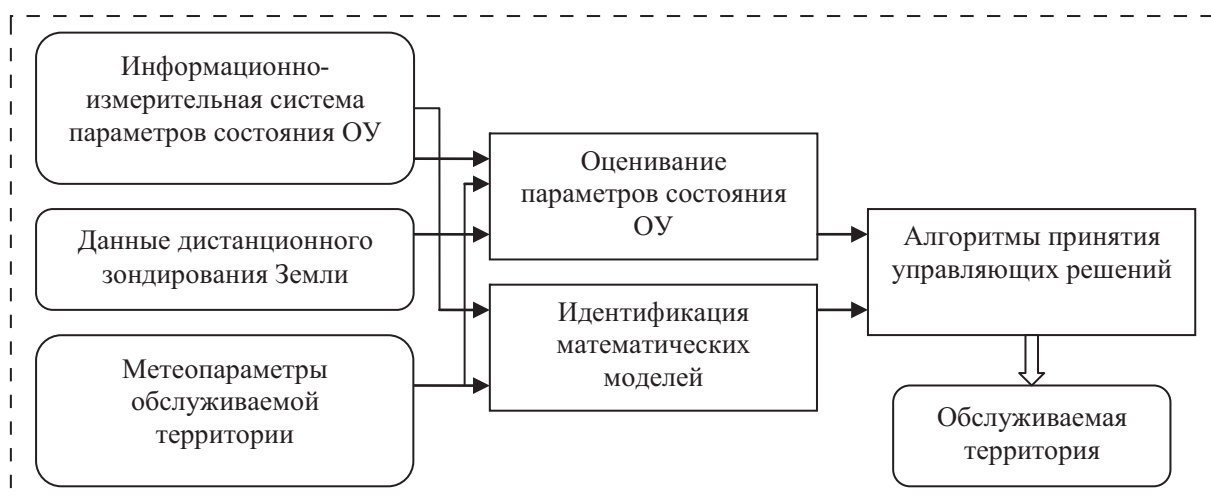


Рис. 1. Блок-схема системы СППР (АСУАТ) с аналитическим блоком принятия управляющих решений.

многопараметрических математических моделей с их последующей адаптацией в реальном времени; оценивание параметров состояния управляемых объектов и систем, по которым находят критерии оптимальности; реализация самих алгоритмов принятия управляющих решений и выработка команд для роботизированных технологических машин. Требуется развитая информационно-вычислительная база и высокая квалификация обслуживающего персонала. Эта проблема может быть решена с переходом к облачным технологиям вычисления, в которых компьютерные ресурсы и мощности предоставляются пользователю как Интернет-сервис. [3, 8, 17]

Возможности облачных технологий позволяют реализовать весь комплекс процедур, необходимый для принятия управляющих решений в аналитических СППР и АСУАТ. Но это не упрощает работу обслуживающего персонала, который кроме выполнения всей сложной последовательности вычислений по поиску оптимальных управляющих решений, должен обеспечить эффективный обмен данными с облаком.

Ситуация меняется при переходе к экспертным системам (ЭС), в которых управляющие решения принимаются непосредственно по входной информации, минуя сложные многоэтапные вычислительные процедуры. Основное информационное ядро ЭС – базы знаний (БЗ). В то же время в системах ТЗ для формирования БЗ невозможно использовать принцип кодирования знаний эксперта, так как ему недоступны оптимальные решения. [3, 11, 12, 17] Экспертную систему с такой БЗ нельзя считать прорывной информационной технологией, потому что она не учитывает современные достижения науки управления и не позволяет оптимизировать принимаемые управляющие решения.

Высокую эффективность ЭС можно обеспечить, если вместо эксперта в качестве источника информации использовать программно-технические комплексы аналитических СППР и АСУАТ, посредством которых формируется большое число оптимальных решений для различных почвенно-климатических условий возделывания сельскохозяйственных культур и множества исходных ситуаций. Каждый такой случай представляет собой оптимальное решение

для заданных условий, обеспечивающее максимизацию результата в управляемой системе.

Формирование БЗ оптимальных решений для заданных условий – это серьезный фундамент высокого научно-технического уровня процесса управления. Но остается неясным, каким образом самому пользователю принимать управляющие решения по БЗ и сигналам своей информационно-измерительной системы. Здесь возможны два подхода. Один из них – поиск оптимального решения методом распознавания образов. Для текущей информационной ситуации отыскивается лучший вариант, рассматриваемый в качестве класса или образа. Учитывая, что таких образов в БЗ может быть очень много, то в виде алгоритмических способов распознавания можно применить методы условных вероятностей классов и «ближайшего соседа» или «минимального расстояния». Во втором случае для поиска оптимального решения используется специальная математическая модель, которая идентифицируется по БЗ, рассматриваемой как обучающая выборка. Ее применение исключает поисковые процедуры по БЗ, ускоряет и упрощает работу экспертной СППР.

На рисунке 2 представлена блок-схема системы СППР с обучением от центра обработки данных, в котором посредством многократного решения задачи управления или принятия управляющих решений формируется БЗ, дополняемая алгоритмом этих действий. Через общедоступное облако БЗ вместе с алгоритмом управления переносится на локальные СППР, где по реально измеренным данным о состоянии управляемой системы, текущим данным ДЗЗ и метеопараметрам принимаются управляющие решения или вырабатываются команды для роботизированных технологических машин.

Блок-схема облачной региональной информационной системы управления агротехнологиями представлена на рисунке 3. Такие центры могут создаваться на базе современных тестовых полигонов, которые кроме полных наборов современных технологических машин ТЗ, должны обладать и программно-техническими комплексами, способными решать все необходимые задачи управления и создавать БЗ для различных почвенно-климатических

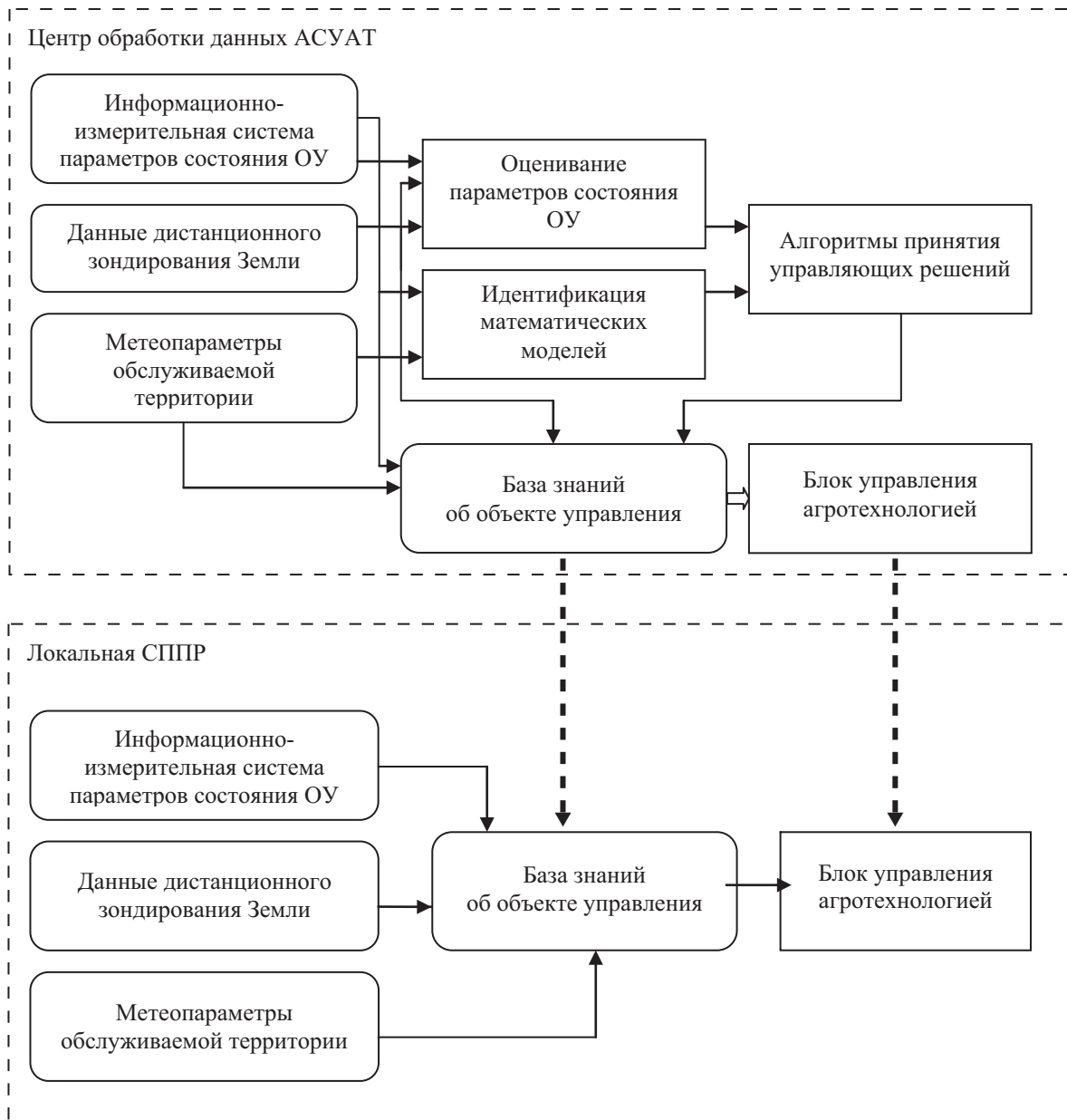


Рис. 2. Блок-схема системы СППР с обучением от центра обработки данных.

условий и сельскохозяйственных культур. Центры должны быть оборудованы средствами телекоммуникаций, хранения и обработки информации, необходимых для организации региональной облачной информационной системы.

Перенос БЗ и алгоритмов управления на локальные системы сопровождается некоторыми потерями оптимальности, полученной при прямом решении аналитическими СППР или АСУАТ. Основным источником потерь – различие параметров математических моделей центра обработки данных и локальных систем управления, которые обусловлены разнообразием физических параметров почв, рельефными особенностями полей, множеством продуктивных свойств сортов сельскохозяйственных культур. Поэтому важнейшие задачи исследований в направлении интеллектуализации управлений агротехнологиями – оценивание потерь оптимальности принимаемых решений при переносах БЗ из центров обработки информации в локальные СППР и АСУАТ.

**Централизованная генерация знаний в интеллектуальных системах управления.** Представлена методика построения экспертных СППР на примере стратегического управления в системах ТЗ. К такому уровню управления относятся задачи выбора оптимальных доз внесения минеральных удобрений и мелиорантов пролонгированного действия в севооборотах различного вида. [5, 7, 13–15] Его отсутствие в современных системах ТЗ приводит к большим потерям урожая культур в севооборотах из-за неточного определения доз внесения агрохимикатов в отдельные вегетационные периоды. Без такого уровня управления агротехнологиями агрономы хозяйств не могут оптимизировать состав и последовательность культур в севооборотах. Создание систем стратегического уровня управления предоставит специалистам эффективный инструментарий для принятия плановых и управляющих решений.

Цель стратегического управления – минимизация потерь урожая всех культур севооборота при

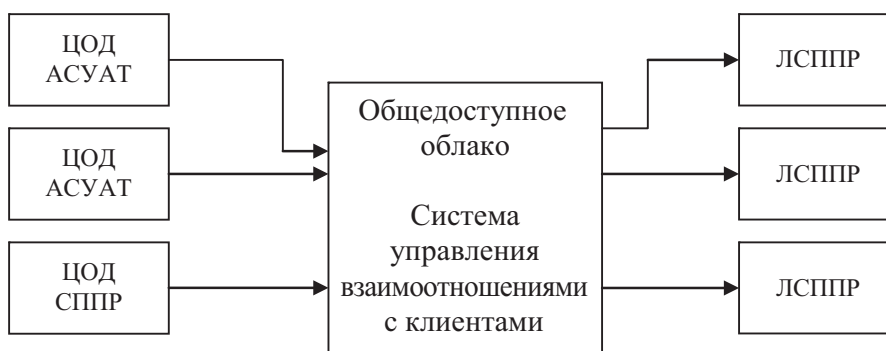


Рис. 3. Облачная региональная информационная система управления агротехнологиями.

наименьших затратах на используемые ресурсы и соблюдении всех технологических и экологических ограничений. Решение задачи этого уровня управления в оптимальных стратегиях внесения удобрений и мелиорантов по всем годам севооборота.

Для последовательности культур в принятом севообороте, обозначаемых индексами  $j = 1, 2, 3, \dots, N$  необходимо найти стратегию внесения основных элементов питания и мелиорантов на заданном поле, обеспечивающую достижение цели управления.

Для формализации задачи вводим вектор средних по площади заданного поля параметров химического состояния почвы  $V = [3 \times 1]$  с компонентами:  $v_1 = pH$ ,  $v_2 = P$ ,  $v_3 = K$  ( $pH$  – кислотность,  $P$  – фосфор,  $K$  – калий). А также вектор нерегулируемых данной стратегией условий возделывания культур  $F = [4 \times 1]$  с компонентами:  $f_1$  – сезонная сумма температур;  $f_2$  – сезонная сумма осадков;  $f_3$  – суммарный приток ФАР;  $f_4$  – годовой расход доступных форм азота.

Принимаем, что для каждой культуры севооборота известны оптимальные значения основных элементов питания и кислотности почвы. Всякое отклонение от них будет приводить к потерям урожая. [5, 7] С учетом того, что все вышеуказанные показатели химического состояния почвы действуют одновременно, для решения задачи используем следующую формулу потерь урожая каждой  $j$ -й культуры в севообороте:

$$\Delta u_j(T) = k_{1j}^T (V_j^* - V(T)) + (V_j^* - V(T))^T K_{2j} (V_j^* - V(T)), \quad (1)$$

где:  $V^*$  – оптимальное значение вектора химического состояния почвы на заданном поле для  $j$ -й культуры севооборота;  $\Delta u_j(T)$  – потери урожая для  $j$ -й культуры севооборота из-за отклонения вектора химического состояния почвы от своего оптимального значения;

$k_{1j}^T = [k_1 \ k_2 \ k_3]_j$  – матрица-строка параметров

линейной части модели;

$$K_{2j} = \begin{bmatrix} k_4 & k_5 & k_6 \\ 0 & k_7 & k_8 \\ 0 & 0 & k_9 \end{bmatrix}_j$$

– матрица параметров квадратичной части модели.

Для идентификации модели (1) требуется наблюдаемый выход – величина потерь урожая за счет отклонения параметров химического состояния от оптимальных значений –  $\Delta u_j(T)$ , который форми-

руется путем сравнения потенциального урожая для  $j$ -й культуры для заданных условий возделывания, определяемых вектором  $F$ , и реального или прогнозируемого урожая  $u_j(T)$  для этих же условий.

$$\Delta u_j(T) = B_j^T F(T) - u_j(T), \quad (2)$$

$B_j^T = [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4]_j$  – вектор параметров линей-

ной модели потенциального урожая.

Оптимизация стратегий внесения агрохимикатов и мелиорантов возможна только при наличии прогнозов химического состояния почвы, по которым возможно оценивать и суммарные потери урожая в севообороте. Для этого необходима динамическая модель всех компонентов химического состояния почвы.

$$\begin{aligned} \&_{1j} &= a_{11} v_{1j}(T) + b_1 d_{Ca}(T) + c_1 f_2(T), \\ \&_{2j} &= a_{22} v_{2j}(T) + b_2 d_P(T) + c_2 f_2(T) + d_2 u_j(T), \\ \&_{2j} &= a_{33} v_{3j}(T) + b_3 d_K(T) + c_3 f_2(T) + d_3 u_j(T), \end{aligned} \quad (3)$$

где:  $u_j(T) = B_j^T F(T) - \Delta u_j(T)$  – урожай культуры с учетом потерь;

$d_P(T)$ ,  $d_K(T)$ ,  $d_{Ca}(T)$  – дозы внесения

элементов питания и мелиоранта по годам севооборота (элементы стратегии);  $a_{11} - a_{33}$ ,  $b_1 - b_3$ ,  $c_1 - c_3$  – параметры модели.

Для формирования оптимальной стратегии внесения агрохимикатов и мелиорантов более удобна каноническая векторно-матричная развернутая форма.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \&_1 \\ \&_2 \\ \&_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(T) \\ v_2(T) \\ v_3(T) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 \\ 0 & 0 & b_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_P(T) \\ d_K(T) \\ d_C(T) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} f_2(T) + \begin{bmatrix} 0 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} u(T). \end{aligned} \quad (4)$$

Ее можно представить в компактном векторном виде:

$$V \& = AV(T) + BD(T) + cf_2(T) + du(t). \quad (5)$$

Формируем критерий оптимальности решения задачи, адекватный поставленной цели управления.

$$I = M\left\{\sum_{T=1}^N [(V^* - V(T))^T G(V^* - V(T)) + c_{Tu} Du_i(T) + C_d^T D(T)]\right\}, \quad (6)$$

где:  $M$  – операция математического ожидания по площади поля;  $G$  – матрица весовых коэффициентов, которыми варьируется соотношение параметров химического состояния почвы;  $c_{Tu}$  – цена единицы урожая  $T$ -й культуры севооборота,  $C_d^T$  – вектор цен на минеральные удобрения по каждому элементу питания.

Критерий (6) имеет смысл среднего риска недополучения урожая в севообороте и перерасхода удобрений.

В соответствии с принципом максимума Понтрягина [3-5] рассмотрим гамильтониан системы (5), (6)

$$H(T) = [(V^* - V(T))^T G(V^* - V(T)) + c_u [K^T (V^* - V(T)) + (V^* - V(T))^T H(V^* - V(T))] + C_d^T D(T)] + \lambda^T [AV(T) + BD(T) + cw(T) + du(t)], \quad (7)$$

где  $\lambda$  – вектор сопряженных переменных, связанных с вектором химического состояния следующим образом:

$$\lambda \& = \frac{\partial H(T)}{\partial V} = [G + H](V^* - V(T) + c_u K + A^T \lambda(T)), \quad T \in (N, 0), \quad \lambda(N) = 0. \quad (8)$$

Частная производная гамильтониана по вектору доз агрохимикатов

$$g(T) = \frac{\partial H(T)}{\partial D} = C_d + B^T \lambda(T). \quad (9)$$

Находим оптимальную стратегию внесения агрохимикатов по всем годам севооборота.

$$D_n^*(T) = D_{n-1}^*(T) - D_n [C_d + B^T \lambda_n(T)], \quad D_1 \leq D_n^*(T) < D_2,$$

$$\text{если } D_n^*(T) < D_1, \text{ то } D_n^*(T) = 0, \quad (10)$$

$$\text{если } D_n^*(T) \geq D_2, \text{ то } D_n^*(T) = D_2,$$

где  $D_1, D_2$  – нижние и верхние границы области допустимых значений доз агрохимикатов.

Структурная схема автоматизированной системы стратегического управления (АССУ) с обучением от центра обработки данных для облачных информационных технологий представлена на рисунке 1. В информационном облаке находится Центр обработки данных АССУ, в котором реализован описанный выше алгоритм стратегического управления. С его помощью формируется БЗ, в которой из множества вариантов начальных значений параметров химического состояния почвы и различных климатических условий для каждого вида севооборота формируются оптимальные стратегии внесения минеральных удобрений и мелиорантов.

В блоке управления агротехнологий на основе БЗ подбирается наиболее эффективный вариант стратегии внесения агрохимикатов с помощью метода распознавания образов, в котором каждый из возможных вариантов стратегии рассматривается, как образ или класс. Целесообразно применение

метода «ближайшего соседа», когда принадлежность к классу оценивается по минимальному расстоянию между векторами

$$\rho_i(T) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ji}(T) - y_j(T))^2}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (11)$$

где:  $i=1, 2, \dots, I$  – номера записей в БЗ,  $y_j, z_j$  – факторы для принятия решений на локальной СППР и по БЗ,  $j=1, 2, \dots, J$  – индексы и общее число компонентов объединенного вектора факторов принятия решений.

Выбор наилучшего варианта оптимальной стратегии из БЗ в локальной СППР принимается по условию

$$I^* = \arg \min_i \rho_i(T). \quad (12)$$

Для апробации системы была спроектирована БЗ из 90 случаев различных начальных условий, для каждого из которых были сформированы оптимальные стратегии внесения мелиорантов и минеральных удобрений для заданного севооборота, включающего в себя последовательность культур: картофель, многолетние травы, пшеница яровая, овощи (свекла столовая), рожь озимая.

Выбраны произвольные начальные условия, как вариант запроса абонента в Центр обработки данных: кислотность – 4,3 кг/га, фосфор – 30,4, калий – 41,8 кг/га.

Для оценки возможных потерь оптимальности для выбранных условий сформирована стратегия внесения мелиорантов и минеральных удобрений с критерием оптимальности 534,55 руб./га.

В соответствии с правилом (12) в БЗ выбран наиболее близкий вариант стратегии: кислотность – 5,1 кг/га, фосфор – 40,2, калий – 42,4 кг/га.

Этому варианту подходит стратегия, эффективность которой – 492,44 руб./га. Сопоставление результатов показывает, что несовпадение начальных условий в БЗ и локальной СППР приводит к потере оптимальности стратегии на 8,5 %.

Для уменьшения потерь оптимальности стратегий внесения мелиорантов и минеральных удобрений необходимо обратить внимание на формирование БЗ, равномерно распространяющейся на всю многомерную область возможных значений начальных условий ведения севооборотов. Для пополнения БЗ могут генерироваться новые варианты оптимальных стратегий посредством вышеописанного алгоритма или реальные данные локальных СППР при их централизованном обслуживании в облачной информационной системе. Для решения о включении очередного варианта оптимальной стратегии в БЗ может использоваться критерий близости вариантов (12). Устанавливаем его пороговое значение  $\Delta$ , и применяем решающее правило:

новый вариант включается в БЗ, если  $\min \rho \geq \Delta$ ,

новый вариант не включается в БЗ, если  $\min \rho < \Delta$ . (13)

Существенный прием повышения надежности экспертной СППР при централизованном обслуживании локальных систем – сегментация БЗ по почвенно-климатическим условиям и сортам сельскохозяйственных культур.

При формировании сегментов БЗ по правилу (13) основным источником потерь оптимальности остаются только различия в параметрах математических моделей (1), (2), (5), потери от которых не превышают 20...25 %, и их устранение возможно только путем адаптации моделей по данным оперативного мониторинга состояния посевов в аналитических АСУАТ, привязанных к конкретным объектам управления.

Представленная методика распространяется и на другие уровни управления агротехнологиями в ТЗ.

**Выводы.** Разработанные алгоритмы, программы и сгенерированные на их основе базы знаний для экспертных систем, погруженные в облачные информационные системы, представляют собой информационно-техническую базу современных интеллектуальных систем управления агротехнологиями. Такой подход к интеллектуализации — системообразующий и позволяет реализовать управление посевами культур одновременно во многих хозяйствах. Для этого необходимы исчерпывающие системы мониторинга состояния посевов. Тогда у менеджеров в хозяйствах будет возможность принимать управляющие решения на основе заранее сформированных баз знаний. Представленный подход к интеллектуализации управления предлагаем воплотить в проекте, который может быть назван «Региональный центр информационного обслуживания экспертных систем управления агротехнологиями» (РЦИО ЭСУА). Реализация проекта возможна в регионах с достаточно развитой информационной базой (Краснодарский край, Белгородская, Ленинградская области другие). Но и для них необходимо разработать документацию, включающую рабочие программно-технические комплексы и мониторинговые информационные системы. По сравнению с локально-объектным подходом к интеллектуализации управления в виде проектов «умное поле», «умная теплица» и «умная ферма» предлагаемый обладает большей масштабностью и требует значительно меньших капиталовложений. Он позволит получить высокую экономическую отдачу за счет повсеместного применения современных информационных средств автоматизированного управления.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аверьянов, М.А. Цифровое общество: Новые вызовы / М.А. Аверьянов, С.Н. Евтушенко Е.Ю. Кочеткова// Экономические стратегии. — 2016. — № 7 (141). — С. 90–91.
2. Добрынин, А.П. «Цифровая экономика — различные пути к эффективному применению технологий»/ А.П. Добрынин, К.Ю. Черних, В.П. Куприяновский // International Journal of Open Information Technologies. — 2016. — № 1 (4). — С. 4–10.
3. Михайленко, И.М. Интеллектуализация управления агротехнологиями /И.М. Михайленко// Вестник российской сельскохозяйственной науки. — 2019. — № 2. — С. 24–31.
4. Михайленко, И.М. Экспертные системы управления агротехнологиями в облачных информационных системах /И.М. Михайленко, В.Н. Тимошин// Вестник российской сельскохозяйственной науки. — 2019. — № 3. — С. 12–18.

5. 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.
6. Михайленко, И.М. Экспертные системы программного управления в точном земледелии /И.М. Михайленко, В.Н. Тимошин// Вестник российской сельскохозяйственной науки. — 2020. — № 2. — С. 11–16.
7. Небольсин, А.Н. Известкование почв /А.Н. Небольсин, З.П. Небольсина. — СПб.: РАСХН, ГНУ ЛенНИИХ, 2010. — 254 с.
8. Разумников, С.В. Моделирование оценки рисков при использовании облачных ИТ-сервисов/С.В. Разумников// Фундаментальные исследования. — 2014. — № 5-1. — С. 39–43.
9. Точное сельское хозяйство (PrecisionAgriculture) / под ред. Д. Шпаара, А.В. Захаренко, В.П. Якушева. — СПб.: ВИЗР, 2009. — 397 с.
10. Указ Президента РФ от 01.12.2016 № 642 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» // Консультант Плюс. [Электронный ресурс URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_207967/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207967/)].
11. Якушев, В.В. Интеллектуальные системы управления для ресурсосберегающих технологий точного земледелия/В.В. Якушев // Экологические системы и приборы. — 2010. — № 7. — С. 26–33.
12. Якушев, В.П. Информационно обеспечение точного земледелия /В.П. Якушев, В.В. Якушев. — СПб.: Изд-во ПИЯФРАН, 2007. — 384 с.
13. 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. — Vol. 99. — P. 405–414.
14. Heatherly, L.G. Managing inputs for peak production. In J.E. Specht & H.R. Boerma (Eds.) / L.G. Heatherly, T.W. Elmore// Soybeans: Improvement, production and uses. — 2004. — P. 451–536. Madison: ASA-CSSA-SSSA.
15. Jones, D. Fuzzy composite programming to combine remote sensing and crop models for decision support in precision crop management / D. Jones, E.M. Barnes // Agricultural Systems. — 2000. — vol. — 65 (3). — P. 137–158.
16. Mikhailenko, I.M. Intelligent real time management of agrotechnologies. Springer. Advances in Intelligent Systems and Computing / I.M. Mikhailenko, V.N. Timoshin// The Editor(s) (if applicable) and The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Switzerland AG 2020 R. Silhavy et al. (Eds.): CoMeSySo. — 2020. — AISC 1295. — P. 491–504.
17. Mikhailenko, I.M. The Concept of Intellectualized Control in Precision Farming. Informatics and Cybernetics in Intelligent Systems / I.M. Mikhailenko, V.N. Timoshin// Springer Nature Switzerland AG 2021. R. Silhavy (Ed.): CSOC 2021. — LNNS 228. — P. 1–11.

#### LIST OF SOURCES

1. Aver'yanov, M.A. Cifrovoe obshchestvo: Novye vyzovy / M.A. Aver'yanov, S.N. Evtushenko, E.Yu. Kochetkova// Ekonomicheskie strategii. — 2016. — № 7 (141). — С. 90–91.
2. Dobrynin, A.P. «Cifrovaya ekonomika — razlichnye puti k effektivnomu primeneniyu tekhnologij»/A.P. Dobrynin, K.Yu. Chernih, V.P. Kupriyanovskij // International Journal of Open Information Technologies. — 2016. — № 1 (4). — S. 4–10.

3. Mihajlenko, I.M. Intellektualizaciya upravleniya agrotekhnologiyami /I.M. Mihajlenko// Vestnik Rossijskoj sel'skochozyajstvennoj nauki. – 2019. – № 2. – S. 24–31.
4. Mihajlenko, I.M. Ekspertnye sistemy upravleniya agrotekhnologiyami v oblachnyh informacionnyh sistemah / I.M. Mihajlenko, V.N. Timoshin// Vestnik Rossijskoj sel'skochozyajstvennoj nauki. – 2019. – № 3. – S. 12–18.
5. Mihajlenko, I.M. Ekspertnye sistemy strategicheskogo upravleniya v tochnom zemledelii /I.M. Mihajlenko, V.N. Timoshin//Vestnik Rossijskoj sel'skochozyajstvennoj nauki. – 2019. – № 5. – S. 4–7.
6. Mihajlenko, I.M. Ekspertnye sistemy programmogo upravleniya v tochnom zemledelii /I.M. Mihajlenko, V.N. Timoshin// Vestnik Rossijskoj sel'skochozyajstvennoj nauki. – 2020. – № 2. – S. 11–16.
7. Nebol'sin, A.N. Izvestkovanie pochv /A.N. Nebol'sin, Z.P. Nebol'sina. – SPb.: RASKHN, GNU LenNIISKH, 2010. – 254 s.
8. Razumnikov, S.V. Modelirovanie ocenki riskov pri ispol'zovanii oblachnyh IT-servisov/S.V. Razumnikov// Fundamental'nye issledovaniya. – 2014. – № 5–1. – C. 39–43.
9. Tochnoe sel'skoe chozyajstvo (PrecisionAgriculture) / pod red. D. Shpaara, A.V. Zaharenko, V.P. Yakusheva. – SPb.: VIZR, 2009. – 397 s.
10. Ukaz Prezidenta RF ot 01.12.2016 № 642 «O Strategii nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossijskoj Federacii» // Konsul'tant Plyus. [Elektronnyj resurs URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_207967/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_207967/)].
11. Yakushev, V.V. Intellektual'nye sistemy upravleniya dlya resursosberegayushchih tekhnologij tochnogo zemledeliya/V.V. Yakushev // Ekologicheskie sistemy i pribory. – 2010. – № 7. – S. 26–33.
12. Yakushev, V.P. Informacionno obespechenie tochnogo zemledeliya /V.P. Yakushev, V.V. Yakushev. – SPb.: Izdvo PIYAFRAN, 2007. – 384 s.
13. 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. – Vol. 99. – P. 405–414.
14. Heatherly, L.G. Managing inputs for peak production. In J.E. Specht & H.R. Boerma (Eds.) / L.G. Heatherly, T.W. Elmore// Soybeans: Improvement, production and uses. – 2004. – P. 451–536. Madison: ASA-CSSA-SSSA.
15. Jones, D. Fuzzy composite programming to combine remote sensing and crop models for decision support in precision crop management / D. Jones, E.M. Barnes // Agricultural Systems. – 2000. – vol. – 65(3). – P. 137–158.
16. Mikhailenko, I.M. Intelligent real time management of agrotechnologies. Springer. Advances in Intelligent Systems and Computing / I.M. Mikhailenko, V.N. Timoshin// The Editor(s) (if applicable) and The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Switzerland AG 2020 R. Silhavy et al. (Eds.): CoMeSySo. – 2020. – AISC 1295. – P. 491–504.
17. Mikhailenko, I.M. The Concept of Intellectualized Control in Precision Farming. Informatics and Cybernetics in Intelligent Systems / I.M. Mikhailenko, V.N. Timoshin// Springer Nature Switzerland AG 2021. R. Silhavy (Ed.): CSOC 2021. – LNNS 228. – P. 1–11.