

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/2019/3/12-17

ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АГРОТЕХНОЛОГИЯМИ В ОБЛАЧНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ*

Переход к «интеллектуальному» сельскому хозяйству является основным вектором модернизации аграрного сектора экономики. Он основан на комплексной автоматизации и роботизации производства, использовании автоматизированных систем принятия решений. Это неизбежно сопровождается существенным увеличением потока данных от датчиков, мониторинговых установок, метеорологических станций, дронов, спутников и других внешних систем. У менеджмента хозяйств появляется возможность использовать различные онлайн-приложения для точных рекомендаций и принятия различного рода управляющих решений. В этом плане наиболее эффективно использование облачных информационных технологий, позволяющих реализовать самый сложный информационно-технический уровень систем автоматизации управления агротехнологиями. Цель настоящей работы заключается в апробации подхода к созданию экспертных систем поддержки принятия управленческих решений (СППР) через базы знаний (БЗ), формируемых в облачной информационной системе. Для этого рассматривается пример построения СППР для выбора оптимальной даты заготовки кормов из многолетних трав. Приводится полная теоретическая и алгоритмическая база аналитической СППР, реализуемой в центре обработки данных облачной информационной системы. На ее основе формируется БЗ для множества различных условий принятия решений. Эта БЗ передается на локальную СППР. Для принятия решений об оптимальных датах заготовки локальной СППР используются два варианта алгоритмов. Первый вариант основан на моделях управления, а второй — на методе распознавания образов. Апробацию алгоритмов проводили по БЗ из 50 случаев. По ее результатам более точным показал себя метод распознавания образов, который обеспечивает гибкую подстройку ситуации на локальной СППР под подобную ситуацию в БЗ. Рассматриваемая методика может быть распространена и на другие сельскохозяйственные культуры.

Ключевые слова: облачные информационные технологии, экспертные системы, поддержка решений, математические модели, распознавание образов, многолетние травы.

I.M. Mikhaylenko, *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 MANAGEMENT SYSTEMS OF AGROTECHNOLOGIES IN CLOUD INFORMATION TECHNOLOGY

The transition to «intellectual» agriculture is the main vector of modernization of the agricultural sector of the economy. It is based on integrated automation and robotization of production, the use of automated decision-making systems. This is inevitably accompanied by a significant increase in data flow from sensors, monitoring systems, meteorological stations, drones, satellites and other external systems. Farm management has the opportunity to use various online applications for accurate recommendations and making various kinds of management decisions. In this regard, the most effective use of cloud information technologies, allowing implementing the most complex information and technical level of automation systems for management of agricultural technologies. The purpose of this work is to test the approach to creating expert management decision support systems (DSS) through the knowledge base (KB), formed in the cloud information system. For this, we consider an example of constructing a DSS for choosing the optimal date for preparing forage from perennial grasses. A complete theoretical and algorithmic database of the analytical DSS implemented in the data processing center of the cloud information system is given. On its basis, a KB is formed for a variety of different decision-making conditions. This knowledge base is transmitted to the local DSS. To make decisions about the optimal dates for the preparation of the local DSS, two variants of algorithms are used. The first option is based on management models, and the second uses the pattern recognition method. The approbation of the algorithms was carried out according to the BZ from 50 cases. According to the results of testing, the method of pattern recognition proved to be more accurate, which provides a more flexible adjustment of the situation on the local DSS to a similar situation in the KB. The considered technique can be extended to other crops.

Key words: cloud information technologies, expert decision support systems, mathematical models, pattern recognition, perennial grasses.

ВВЕДЕНИЕ

За последние 30 лет компьютеры, а вместе с ними и информационные технологии прочно вошли в жизнь общества, включая производственные и непроизводственные сферы экономики. [1, 2] Не стало исключением и сельское хозяйство, которое сталки-

вается с множеством трудностей и проблем. В основе модернизации аграрного сектора лежит переход к «интеллектуальному» сельскому хозяйству, основанному на комплексной автоматизации и роботизации производства, использовании автоматизированных систем принятия решений, современных технологий моделирования и проектирования экосистем.

* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-016-00008). / The work has been conducted partially support by Russian Foundation for Basic Research (project № 18-016-00008).

Интеллектуализация превращает сельское хозяйство в сектор с очень интенсивным потоком данных. Информация поступает от различных устройств, расположенных в поле, на ферме, от датчиков агротехники, метеорологических станций, дронов, спутников, внешних систем, партнерских платформ, поставщиков. Общие данные от различных участников производственной цепочки, собранные в одном месте, позволяют получать информацию нового качества, находить закономерности, создавать добавочную стоимость для всех вовлеченных участников, применять современные научные методы обработки (data science) и на их основе принимать правильные решения, минимизирующие риски, улучшающие бизнес производителей и клиентский опыт.

В работе [8] рассмотрено одно из направлений интеллектуализации управления агротехнологиями, основанное на использовании облачных информационных технологий. Особое внимание уделено возможности практической реализации систем автоматизированного управления с учетом кадровой проблемы. Показано, что высокий научно-технический уровень систем и простота их использования обеспечивается путем создания экспертных систем управления, в которых базы знаний (БЗ) формируются посредством алгоритмов аналитических систем управления, реализующих современную теорию управления в полном объеме.

Цель работы — апробация предлагаемой методики на примере построения экспертной системы, ориентированной на использование облачных технологий.

АЛГОРИТМ АНАЛИТИЧЕСКОЙ СППР ПО ДАТЕ ЗАГОТОВКИ КОРМОВ

Среди управляющих решений, принимаемых менеджментом хозяйств, наиболее важные и ответственные — решения о сроках уборки урожая сельскохозяйственных культур. Особенно они актуальны в управлении процессами заготовки кормов из многолетних трав в течение вегетационного периода. Выбор удобного и актуального критерия служит отправным пунктом решения данной задачи. Такой критерий должен отражать баланс между количественными и качественными показателями травостоя. Качественные показатели готового корма влияют на его переваримость (усваиваемость) животными. Этот показатель наиболее распространен в молочном животноводстве, он оценивается в процентах и может быть определен следующей регрессионной зависимостью [10]:

$$\pi(k, p) = b_0 + b_1 k + b_2 p + b_3 k p, \quad (1)$$

где: p, k — содержание протеина и клетчатки в сухом веществе травостоя, %; $b_0 - b_3$ — параметры модели.

Для обоснования критерия оптимальности принятия решений при заготовке кормов необходимо иметь в виду, что цель всей системы кормозаготовки — получение заданной урожайности травостоя с заданными параметрами качества. С учетом ранее принятых обозначений, формализованный вариант критерия, использующий показатель переваримости кормов, имеет следующий вид [10]:

$$I(T) = g_1(m(T) - m^*)^2 + g_2(\pi(k, p|T) - \pi^*(k, p))^2, \quad (2)$$

где $m(T)$, m^* — прогнозное и заданное значение величины биомассы травостоя (урожайности), кг/м²; $\pi(k, p|T)$, $\pi^*(k, p)$ — прогнозное и заданное значение

показателя переваримости биомассы травостоя (функция от %-ого содержания в сухом веществе клетчатки и протеина) g_1, g_2 — весовые множители, посредством которых устанавливается требуемый баланс между массовыми и качественными компонентами критерия и его безразмерный характер.

Критерий (2) имеет явно выраженный минимум, что соответствует балансу его компонентов, то есть отражает компромисс между количеством и качеством убираемой биомассы. Обозначим решающее правило о сроках заготовки кормов, с учетом баланса составляющих критерия:

$$T = T^* \text{ (укос)}, T^* = \operatorname{argmin} I(T).$$

Для оценки параметров состояния травостоя, входящих в критерий (2), необходимы математические модели, отражающие динамику величины биомассы и ее качественных показателей, а также модели, определяющие связь параметров состояния биомассы с показателями оптического отражения в системах ДЗЗ.

Решая поставленную задачу, мы используем два основных блока математических моделей: структуры биомассы и ее качественных показателей. Каждый из них имеет канонический векторно-матричный вид [6, 10].

Блок структуры биомассы в развернутой форме

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1m} \\ \dot{x}_{2m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} x(t)_{1m} \\ x(t)_{2m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix}, \quad t \in (T_i, T_{i+1}), \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x_{1m}(0) \\ x_{2m}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} w_1(0) \\ w_2(0) \\ w_3(0) \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} y_{1m}(t) \\ y_{2m}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \frac{100}{y_{1m}(t)} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1m}(t) \\ x_{2m}(t) \end{bmatrix}; \quad (4)$$

или в символической векторно-матричной

$$\dot{X}_m = A_m X_m + C_m F(t) + B_m U(t), \quad (5)$$

$$X_m(0) = D_{m1} W(0),$$

$$Y_m(t) = H_m(t) X_m(t). \quad (6)$$

Блок качественных показателей биомассы в развернутой форме

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1k} \\ \dot{x}_{2k} \\ \dot{x}_{3k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} x(t)_{1k} \\ x(t)_{2k} \\ x(t)_{3k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix}, \quad t \in (T_i, T_{i+1}),$$

$$\begin{bmatrix} x_{1k}(0) \\ x_{2k}(0) \\ x_{3k}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} w_1(0) \\ w_2(0) \\ w_3(0) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} y_{1k}(t) \\ y_{2k}(t) \\ y_{3k}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{100}{y_{1m}(t)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{100}{y_{1m}(t)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{100}{y_{1m}(t)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1k}(t) \\ x_{2k}(t) \\ x_{3k}(t) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} x_{1k}(t) \\ x_{2k}(t) \\ x_{3k}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} [x_{1m}(t)],$$

или в символической векторно-матричной

$$\dot{X}_k = A X_k + C_k F(t) + B U(t), \quad (9)$$

$$X_k(0) = D_{k1} W(0),$$

$$Y_k(t) = H_k(t) X_k(t). \quad (10)$$

За состояния принимаем: в блоке структуры биомассы — x_{1m} , x_{2m} — сухую и сырую надземную массу растений, кг/м², в блоке качественных показателей — x_{1k} , x_{2k} и x_{3k} — массу клетчатки, легко-растворимых углеводов и сырого протеина в сухой массе растений, кг/м². Внешние возмущения в обоих блоках: f_1 — среднесуточная температура воздушной среды, °C; f_2 — среднесуточный уровень радиации, Вт/(м² · ч.); f_3 — среднесуточный уровень осадков, мм, f_4 — влагосодержание почвы. Возмущения начальных условий в обоих блоках модели: содержание (г/кг) доступного азота в почве w_1 ; доступного калия w_2 ; доступного фосфора w_3 . Непосредственно наблюдаемыми величинами в блоке структуры биомассы были приняты: y_{1m} — общая надземная биомасса растений, кг/м²; y_{2m} — процентное содержание сухого вещества в общей биомассе, а в блоке качественных показателей y_{1k} , y_{2k} и y_{3k} — процентное содержание клетчатки, легко-растворимых углеводов и сырого протеина в сухом веществе соответственно. Факторы управления в моделях (4), (8): u_1 — содержание в почве доступного азота, г/м²; u_2 — влагосодержание почвы, мм. **Параметры модели структуры биомассы:** $a_{11,m}$ — $a_{22,m}$ — динамические, $c_{11,m}$ — $c_{23,m}$ — передачи внешних возмущений, $b_{11,m}$ — $b_{22,m}$ — передачи управлений, $d_{11,m}$ — $d_{13,m}$ — модели начальных условий; X_m — вектор параметров состояния модели, Y_m — вектор наблюдаемых величин; A_m , C_m , B_m , D_m — соответственно динамическая матрица, матрицы передачи возмущений, управлений и начальных условий в векторно-матричной форме модели структуры биомассы. **Параметры модели блока качественных показателей биомассы:** $a_{11,k}$ — $a_{33,k}$ — динамические, $c_{11,k}$ — $c_{33,k}$ — передачи внешних возмущений, $b_{11,k}$ — $b_{22,k}$ — передачи управлений, $d_{11,k}$ — $d_{33,k}$ — модели начальных условий, X_k — вектор параметров состояния модели, Y_k — вектор наблюдаемых величин, A_k , C_k , B_k , D_k — соответственно динамическая матрица, матрицы передачи возмущений, управлений и начальных условий в векторно-матричной форме модели; k_1 , k_2 , k_3 — параметры связи массовых и качественных параметров биомассы. Общие для обоих блоков модели векторы внешних возмущений, управлений и возмущений начальных условий — F , U , W соответственно.

С учетом переменных приведенных моделей критерий принятия решений (3) будет иметь следующий вид:

$$I(T) = [(g_1(x_{1m}(T) + x_{2m}(T)) - m^*)^2 + g_2 [\pi(y_{1k}, y_{3k}|T) - \pi^*(y_{1k}, y_{3k})]^2]. \quad (11)$$

Теперь нам необходимо показать, каким образом осуществляется дистанционное зондирование посева многолетних трав. С точки зрения современной информационной теории такой метод характеризуется, как восстановление информации о состоянии объекта по косвенным наблюдениям. [4, 5, 11] В этом случае на основе закона отражения света от неоднородной шероховатой поверхности (поверхность посева) может использоваться модель [5, 11]:

$$z_1 = p_1 e^{-p_2(x_{1m} + x_{2m})} + x_1, \quad (12)$$

$$z_2 = p_3 e^{-p_4 x_{2m}} + x_2, \quad (13)$$

где: z_1 , z_2 — параметры отражения системы ДЗЗ в инфракрасном и видимом диапазонах, p_1 — p_4 — параметры моделей, x_1 , x_2 — случайные ошибки моделирования — нулевые средние значения и дисперсии d_1 , d_2 .

Экспоненциальная форма моделей ДЗЗ неустойчива к идентификации, поэтому целесообразно разложить функции в степенные ряды:

$$z_1 = p_{11} + p_{12}x_{1m} + p_{13}x_{2m} + p_{14}x_{1m}^2 + p_{15}x_{2m}^2 + p_{16}x_{1m}^3 + p_{17}x_{2m}^3 + x_1 \quad (14)$$

$$z_2 = p_{21} + p_{22}x_{1m} + p_{23}x_{2m} + p_{24}x_{1m}^2 + p_{25}x_{2m}^2 + p_{26}x_{1m}^3 + p_{27}x_{2m}^3 + x_2. \quad (15)$$

Вводя векторы и матрицу параметров, преобразуем модель в векторно-матричную форму:

$$Z = P^T W(X_m) + X \quad (16)$$

Таким образом, мы получили аналитическое представление критерия и решающего правила принятия решений на его основе, а также математические модели, позволяющие оценивать и прогнозировать его величину.

Наличие моделей динамики биомассы травостоя (5) и модели оптических измерений ДЗЗ (16) позволяет оптимально оценивать структуру биомассы, используя методику оптимальной фильтрации. [3, 4, 7, 9]

$$\hat{X}_m = A \hat{X}_m(t) + C_m F(t) + B_m U(t) +$$

$$+ R(t) \frac{\partial W^T(\hat{X}_m)}{\partial \hat{X}_m} S^{-1} (Z(t) - W(\hat{X}_m))$$

$$\dot{R} = R(t) A_m^T + A_m R(t) - R(t) \frac{\partial W^T(P, \hat{X}_m)}{\partial \hat{X}_m} S^{-1} \frac{\partial W(P, \hat{X}_m)}{\partial \hat{X}_m} R(t),$$

$$\hat{X}_m(0) = \hat{X}_{0m}, P(0) = \text{cov}[\hat{X}_{0m}], S = \text{cov}[\Xi], \quad (17)$$

где: $\hat{X}_m$ — оптимальная средняя по площади поля оценка вектора параметров состояния биомассы травостоя, R — матрица ковариаций априорных ошибок оценивания, $\text{cov}[\hat{X}_{0m}]$ — матрица ковариаций начальных условий в модели динамики состояния биомассы травостоя; $\text{cov}[\Xi]$ — матрица ковариаций ошибок измерения оптических параметров.

Для реализации алгоритма (17) — центрального информационного ядра всей системы поддержки принятия решений о сроках уборки многолетних трав, необходимы наземные измерения химического состояния почвы (вектор управления $U(t)$) внешних метеорологических условий (вектор $F(t)$), начальных условий (вектор $\hat{X}_{0m}$) и данных ДЗЗ (вектор $Z(t)$). На рисунке (см. первую стр. обл.) отражена методика получения информации о состоянии посева многолетних трав,

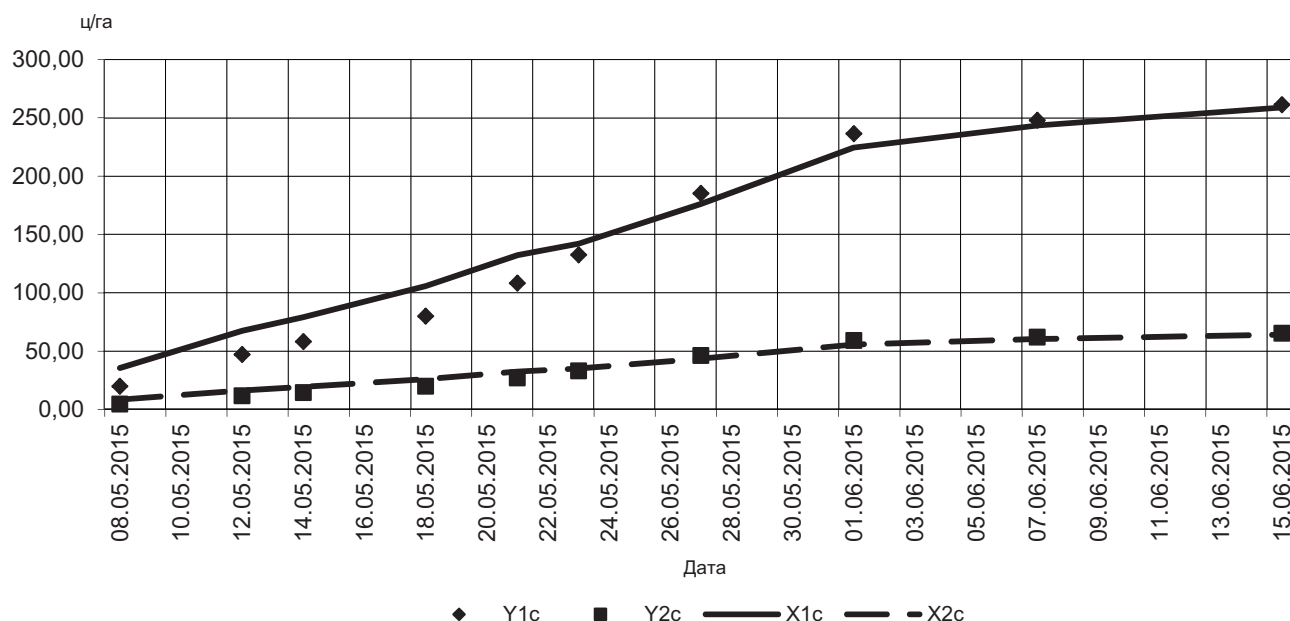


Рис. 1. Процесс оценивания состояния биомассы травостоя.

используемая для идентификации математических моделей и их адаптации в реальном времени. [7, 9, 10] На основном поле с многолетними травами выделены 10–15 тестовых площадок по 20...25 м². Так как тестовые площадки занимают часть основного поля, то они имеют такие же физические характеристики почв и на них посеяны такие же многолетние травы, как и на основном поле. Различия между самими площадками и основным полем заключаются в дозах внесения минеральных удобрений и увлажнении почвы. Над тестовыми площадками установлена мачта с камерой приземного дистанционного зондирования, которая служит источником информации о состоянии посевов в реальном времени. Камера дистанционного зондирования имеет два оптических канала (видимый и инфракрасный), что позволило с достаточной точностью и надежностью решать задачу оценивания параметров биомассы травостоя многолетних трав. Аналогичной камерой в настоящее время оборудованы и беспилотные летательные аппараты, используемые нами в системе мониторинга сельскохозяйственных полей. Такая же информация доступна и на отечественных спутниковых системах мониторинга («Ресурс» и «Ресурс П»).

После первых 5–6 шагов идентификации математических моделей, переходят к режиму принятия решений. Для этого посредством системы ДЗЗ,

базирующейся на беспилотном или космическом летательном аппарате, в момент времени t осуществляют съемку посева травостоя на основном поле, для которого необходимо принимать решение о дате уборки. В результате этого формируют среднее по площади поля значение вектора показателей отражения $Z(t)$, на основании которого по алгоритму (18) строится средний вектор оценок параметров биомассы $\hat{X}_m(t)$, он и принимается в качестве начальных условий для краткосрочного (на 2–5 сут.) прогнозирования состояния биомассы. Используя соотношения (9) связи массовых и качественных показателей травостоя определяют начальные условия для прогнозирования параметров $\hat{y}_{1k}(t), \hat{y}_{2k}(t), \hat{y}_{3k}(t)$ и $\hat{x}_{1k}(t), \hat{x}_{2k}(t), \hat{x}_{3k}(t)$. В процессе оценивания параметров состояния биомассы по данным ДЗЗ, как и при идентификации математических моделей, величина ошибок не превышает 10%-й уровень (рис. 1).

С помощью моделей (6), (10) прогнозируют состояние биомассы и ее качественных показателей, а также значения критерия (12) до тех пор, пока не будет выполнено условие $T^* = \operatorname{argmin} I(T)$ (укос). На рисунке 2 представлен график прогнозных значений критерия (11), где показано, что решение о проведении укоса принимают на 14-е сутки с начала первого межукосного периода вегетации многолетних трав.

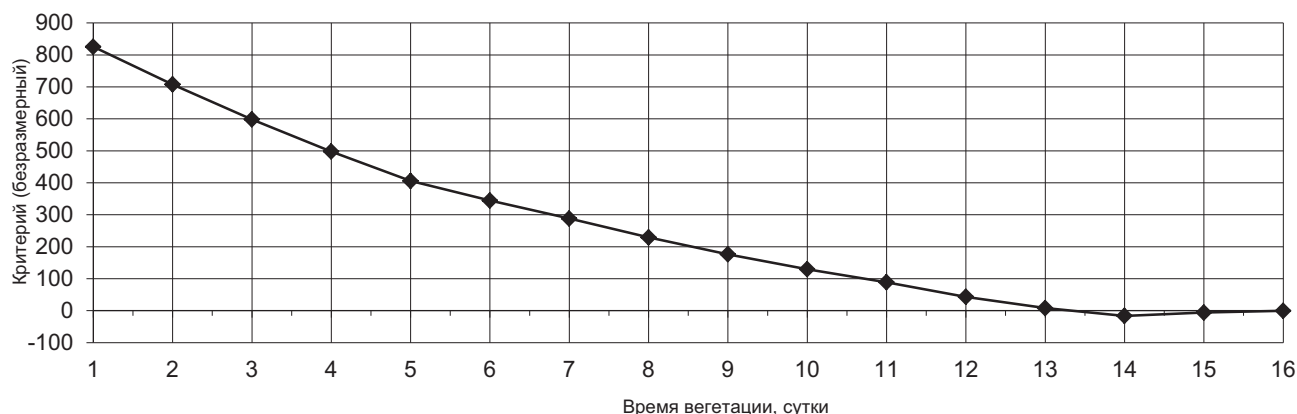


Рис. 2. Прогнозирование критерия принятия решения о дате уборки биомассы трав.

Заданные значения урожайности биомассы – 150 ц/га, а показателя переваримости – 89%. Прогнозные значения, для решения о дате укоса: урожайность биомассы – 148 ц/га, показатель переваримости – 85%. Весовые множители критерия принятия решений: $g_1 = 0,07$; $g_2 = 3,0$.

ПОСТРОЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ СППР

В соответствии с блок-схемой экспертной СППР (рис. 3) с обучением от центра обработки данных (ЦОД) на локальные системы посредством облачной технологии передаются БЗ и алгоритм принятия управляющих решений. Формируется БЗ в ЦОД путем аналитического решения задачи для различных условий. Каждый набор таких условий и полученных решений выполняется элементарной записью БЗ. Для рассматриваемой задачи, с учетом принятых обозначений переменных, такая запись имеет вид: $\{X_m, X_k, Y_m, Y_k, F, U, T, I\}$. Входные параметры: векторы массовых X_m и качественных параметров X_k биомассы, наблюдаемые величины этих параметров Y_m, Y_k , вектор параметров метеословий F и управляемых факторов U , время прогнозирования T ; выходной параметр – критерий принятия управляющего решения I .

При использовании моделей управления, необходимо учитывать тот факт, что решение о дате уборки урожая (укос) принимается по прогнозу минимума критерия $I(T)$, поэтому необходимо располагать столькими моделями принятия решений, сколько суток включает в себя интервал прогнозирования

$$I(T) = K_T Z(T), \quad (18)$$

где: $Z(T)$ – объединенный вектор входных данных БЗ, K_T – матрица-строка параметров локальных моделей для T – x суток.

С учетом введенных моделей можно выразить решение о дате уборки:

$$T^* = \operatorname{argmin} \{K_T Z(T)\}. \quad (19)$$

При использовании подхода распознавания образов целесообразно применять метод «ближайшего соседа», когда принадлежность к классу оценивается по минимальному расстоянию между векторами.

$$\rho_i(T) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ji}(T) - y_j(T))^2}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (20)$$

где: y_j – факторы для принятия решений на локальной СППР, $j = 1, 2, \dots, J$ – индексы и общее число компонентов объединенного вектора факторов принятия решений.

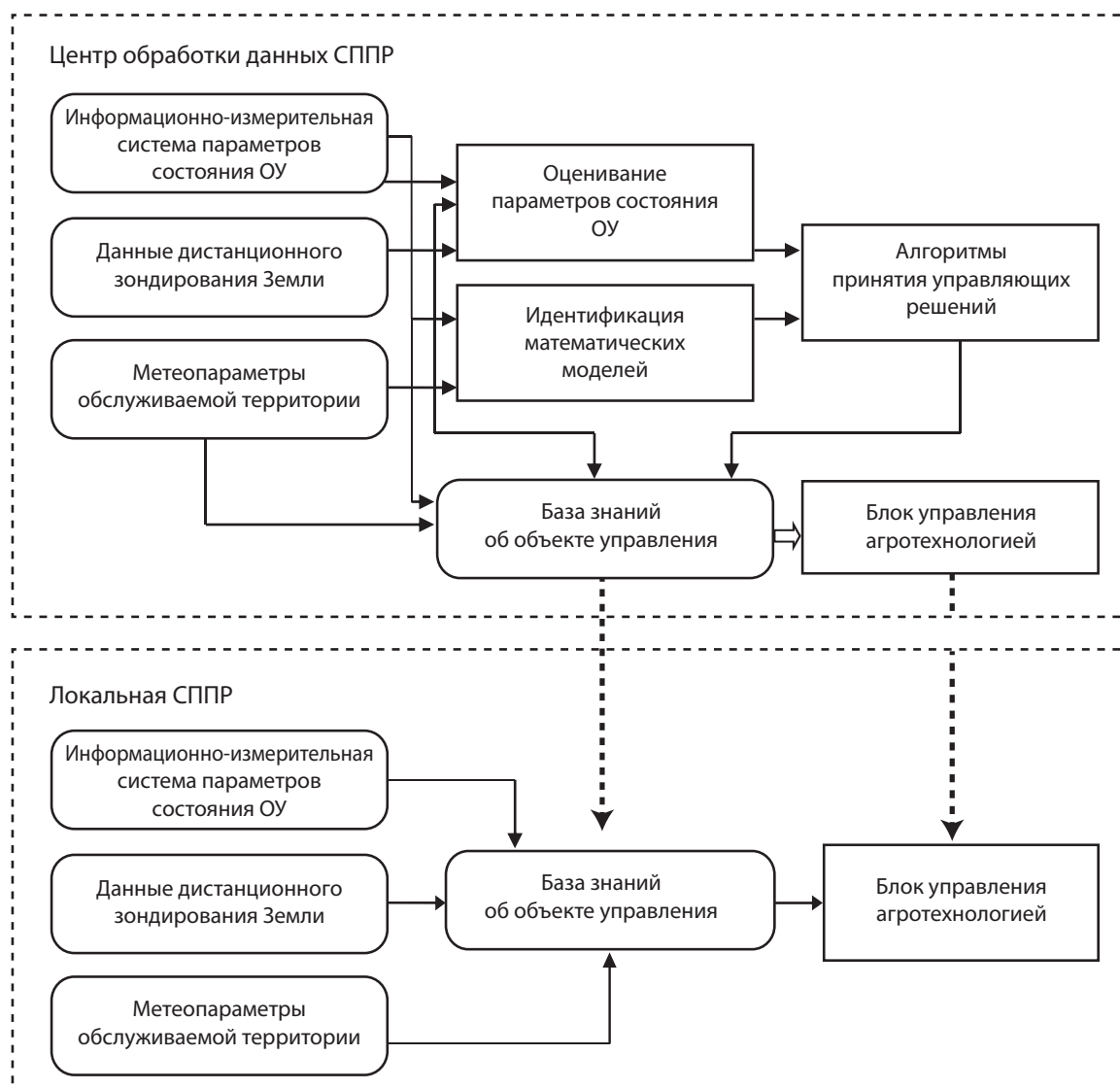


Рис. 3. Блок-схема системы СППР с обучением от центра обработки данных.

Результаты апробации локальной СППР по методу модели принятия решений

Таблица 1.

№ п/п	Прогноз критерия принятия решений		Решения о дате уборки, сут.		Ошибка принятия решений, сут.
	Аналитическое	Локальная СППР	Аналитическое	Локальная СППР	
1	21,39	52,24	7	5	+2
2	46,38	30,54	5	3	+2
3	45,86	32,15	7	6	+1
4	12,57	19,36	5	6	-1
5	44,74	36,13	3	5	-2
6	53,94	46,54	2	4	-2
7	5,47	16,62	3	2	+1
8	37,49	64,78	3	5	-2

Результаты апробации локальной СППР по методу распознавания образов

Таблица 2.

№ п/п	Прогноз критерия принятия решений		Решения о дате уборки, сут.		Ошибка принятия решений, сут.
	Аналитическое	Локальная СППР	Аналитическое	Локальная СППР	
1	21,39	41,30	7	6	+1
2	46,38	40,39	5	4	+1
3	45,86	28,05	7	7	0
4	12,57	49,14	5	5	0
5	44,74	28,63	3	4	-1
6	53,94	28,60	2	3	-1
7	5,47	64,11	3	2	+1
8	37,49	75,68	3	4	-1

Решение о принадлежности вектора измеренных факторов принятия решений на локальной СППР принимается по условию

$$T^* = \arg \min_i \rho_i(T) \quad (21)$$

Приведены результаты апробации локальной СППР по модели принятия решений (табл. 1), и по методу распознавания образов (табл. 2). Для апробации посредством аналитической СППР была сформирована БЗ из 50 случаев для различных входных данных с указанными выше параметрами.

Решения по выбору оптимальной даты укоса травостоев принимали для произвольного набора входных данных локальной СППР, которая располагала БЗ, полученной из облака центра обработки. В локальных СППР возможны ошибки в принятии решений по оптимальным датам уборки в пределах ± 2 сут., что обусловлено погрешностями аппроксимации и идентификации этих моделей. Метод распознавания образов обладает большей гибкостью, и его потенциальная точность существенно возрастает при увеличении числа случаев в БЗ. Это связано с существенным ростом вероятности появления случаев, близких к реальным условиям локальной СППР.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Аверьянов, М.А. Цифровое общество: Новые вызовы / М.А. Аверьянов, С.Н. Евтушенко, Е.Ю. Кочеткова // Экономические стратегии. — 2016 г. — № 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. Де Гроот М. Оптимальные статистические решения (De Groot M. Optimal'nyye statisticheskiye resheniya). М.: Мир. — 1974. — 491 с.

4. Казаков, И.Е. Методы оптимизации стохастических систем // И.Е. Казаков — М.: 1987. — Наука. — 349 с.
5. Кочубей, С.М. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики / С.М. Кочубей, Т.М. Шадчина, Н.И. Кобец. — Киев: Наукова думка. — 1990. — 134 с.
6. Михайленко, И.М. Математическое моделирование системы «почва — растение — атмосфера» на примере многолетних трав / И.М. Михайленко, В.Н. Тимошин, Т.Н. Данилова // Доклады РАСХН. — 2009. — № 4. — С. 61–64.
7. Михайленко, И.М. Основные задачи оценивания состояния посевов и почвенной среды по данным космического зондирования / И.М. Михайленко // Экологические системы и приборы. — № 8. — 2011. — С. 17–25.
8. Михайленко, И.М. Интеллектуализация управления агротехнологиями / И.М. Михайленко // Вестник российской сельскохозяйственной науки. — 2019. — № 2. — С. 24–28.
9. Михайленко, И.М. Теоретические основы и техническая реализация управления агротехнологиями / И.М. Михайленко — Изд. СПбГТУ. — 2017. — 250 с.
10. Михайленко, И.М. Принятие решений о дате заготовки кормов на основе данных дистанционного зондирования Земли и подстраиваемых математических моделей // И.М. Михайленко, В.Н. Тимошин / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2018. — Т. 15. — № 1. — С. 164–175.
11. Рачкулик, В.И. Отражательные свойства и состояние растительного покрова / В.И. Рачкулик, М.В. Ситникова — Л.: Гидрометеиздат. — 1981. — 287 с.

LIST OF SOURCES

1. Aver'yanov, M.A. Cifrovoye obshchestvo: Novyye vyzovy / M.A. Aver'yanov, S.N. Evtushenko, E.Yu. Kochetkova // Ekonomicheskie strategii. — 2016 g. — № 7 (141). — С. 90–91.
2. Dobry'nin, A.P. Cifrovaya e'konomika — razlichny'e puti k e'ffektivnomu primeneniyu tekhnologiy / A.P. Dobry'nin, K.Yu. Chernix, V.P. Kupriyanovskiy // International Journal of Open Information Technologies. — 2016. — № 1 (4). — С. 4–10.
3. De Groot M. Optimal'ny'e statisticheskiye resheniya (De Groot M. Optimal'nyye statisticheskiye resheniya). — М.: Mir. — 1974. — 491 s.
4. Kazakov, I.E. Metody optimizatsii stokhasticheskix sistem // I.E. Kazakov — М.: 1987. — Nauka. — 349 s.
5. Kochubei, S.M. Spektral'ny'e svoystva rasteniy kak osnova metodov distantsionnoy diagnostiki / S.M. Kochubei, T.M. Shadchina, N.I. Kobecz — Kiev: Naukova dumka. — 1990. — 134 s.
6. Mixajlenko, I.M. Matematicheskoe modelirovanie sistem / «pochva — rastenie — atmosfera» na primere mnogoletnix trav / I.M. Mixajlenko, V.N. Timoshin, T.N. Danilova // Doklady RASXN. — 2009. — № 4. — С. 61–64.
7. Mixajlenko, I.M. Osnovny'e zadachi ocenivaniya sostoyaniya posevov i pochvennoj sredy po danny'm kosmicheskogo zondirovaniya / I.M. Mixajlenko // E'kologicheskiye sistemy i pribory. — № 8. — 2011. — С. 17–25.
8. Mixajlenko, I.M. Intellectualizatsiya upravleniya agrotekhnologiyami / I.M. Mixajlenko // Vestnik rossijskoj sel'skoxozyajstvennoj nauki. — 2019. — № 2. — С. 24–28.
9. Mixajlenko, I.M. Teoreticheskiye osnovy i texnicheskaya realizatsiya upravleniya agrotekhnologiyami / I.M. Mixajlenko — Izd. SpbGTU. — 2017. — 250 s.
10. Mixajlenko, I.M. Prinyatie reshenij o date zagotovki kormov na osnove danny'x distantsionnogo zondirovaniya Zemli i podstraivaemy'x matematicheskix modelej // I.M. Mixajlenko, V.N. Timoshin / Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. — 2018. — Т. 15. — № 1. — С. 164–175.
11. Rachkulik, V.I. Otrazhatel'ny'e svoystva i sostoyanie rastitel'nogo pokrova / V.I. Rachkulik, M.V. Sitnikova — L.: Gidrometeoizdat. — 1981. — 287 s.