



СТРУКТУРА ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

✉ Нечаев А.И.

Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук
Новосибирская область, р.п. Краснообск, Россия

✉ e-mail: netaew@mail.ru

Рассмотрены проблемы построения и реализации структуры информационно-управляющей системы (ИУС) возделывания зерновых культур на основе оптимизации выбора агротехнологий с точки зрения методов теории управления, системного и компартментального подходов. В качестве объектов управления рассмотрены почва, возделываемая культура и экология используемого участка агроландшафта. Сделан вывод о том, что ИУС относится к классу систем адаптивного управления с прогнозированием многомерным динамическим стохастическим объектом. Показано новое качество системы управления, существенно определяющее ее структуру, – наличие контура управления поддержания плодородия почвы и экологии в севообороте и контура управления агроценозом культуры. Предложена иерархическая структурная схема системы управления объектом с прогнозированием, реализующая функциональные преобразования информационного потока в ИУС. В качестве критерия выбора альтернативной агротехнологии использована эколого-экономическая эффективность, модифицированная с учетом целей управления и состава машинно-тракторного парка. Аналитическое описание процессов агробиосистемы на современном уровне базируется на компартментальном подходе с описанием явлений в виде дифференциальных уравнений. Содержание компартмента описывает процесс переноса энергии и массы в системе почва – растительный покров – приземный слой воздуха на основе функционального (теоретического) динамического имитационного моделирования. По результатам информационного обзора, реализация подобной системы управления в настоящее время не выявлена. Использование эмпирических имитационных моделей в ИУС неприемлемо, так как смена культуры или природно-климатической зоны потребует разработки новой эмпирической модели. Проанализированы системы имитации биофизических процессов WOFOST, DSSAT, DSSAT Cropping System (CSM), APSIM и AGROTOOL, использующие методы функционального динамического имитационного моделирования в рамках компартментального подхода. Разработанная структура ИУС с использованием модели продуктивности посевов AGROTOOL реализуется при условии создания новых модулей компартментов.

Ключевые слова: адаптивно-ландшафтное земледелие, агротехнологии, математическое моделирование, информационно-управляющие системы, компартментальный подход

STRUCTURE OF THE INFORMATION MANAGEMENT SYSTEM OF CEREAL CROPS CULTIVATION

✉ Nechaev A.I.

Siberian Federal Scientific Centre of AgroBioTechnologies of the Russian Academy of Sciences
Krasnoobsk, Novosibirsk region, Russia

✉ e-mail: netaew@mail.ru

The problems of constructing and implementing the structure of the information management system (IMS) for the cultivation of grain crops based on the optimization of the choice of agricultural technologies in view of the methods of the management theory, system and compartmental approaches are considered. The objects of management are soil, a cultivated crop and ecology of the agricultural landscape area used. It is concluded that the IMS belongs to the class of adaptive control systems with prediction by a multidimensional dynamic stochastic object. A new quality of the management system, which significantly determines its structure, is shown, namely the presence of a control loop for maintaining soil fertility and ecology in crop rotation and a control loop for the agrocenosis of the crop. A hierarchical block diagram of the object management system with forecasting is proposed, which implements functional transformations of the information flow in the IMS. As a criterion for choosing an alternative agricultural technology, environmental and economic efficiency was used, modified in view of the management goals and the composition of the machine and tractor fleet. The analytical description of the processes of the agrobiosystem at the modern level is based on the compartmental approach with the description of phenomena in the form of differential equations. The content of the compartment describes the process of energy and mass transfer in the system: soil – vegetation cover – ground layer of the air based on functional (theoretical) dynamic simulation. Based on the results of the information review, the possibility of implementation of such a management system has not been currently identified. The use of empirical simulation models in the IMS is unacceptable, since a change in a crop or natural-climatic zone will require the development of a new empirical model. The systems for simulating biophysical processes WOFOST, DSSAT, DSSAT Cropping System (CSM), APSIM and AGROTOOL, using methods of functional dynamic simulation within the framework of the compartmental approach, have been analyzed. The developed IMS structure using the AGROTOOL crop productivity model is implemented on condition that new modules of compartments are created.

Keywords: adaptive landscape agriculture, agricultural technologies, mathematical modeling, information management systems, compartmental approach

Для цитирования: Нечаев А.И. Структура информационно-управляющей системы возделывания зерновых культур // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2021. Т. 51. № 2. С. 96–106. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2021-2-12>

For citation: Nechaev A.I. Structure of the information management system of cereal crops cultivation. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki* = *Siberian Herald of Agricultural Science*, 2021, vol. 51, no. 2, pp. 96–106. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2021-2-12>

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Автоматизация управления возделыванием зерновых культур преследует цель внедрения цифровых технологий. В частности, информационно-управляющие системы (ИУС) применяются для расчета параметров агротехнологий, определяющих проведение технологических операции на поле. При этом проблема создания ИУС на уровне сельскохозяйственных предприятий в настоящее время не решена, поскольку многие процессы в объекте управления (почва, культура, экология) не описаны в аналитической форме, достаточной для синтеза реализуемой структуры ИУС.

Рассмотрим пути решения поставленной проблемы, ограничивая анализ управления возделыванием зерновых культур участком агроландшафта (поле) с заданной системой севооборота и сезонным характером управляющих воздействий. Такой метод управления относится к управлению с прогнозированием¹ на основе создания новой информации в ходе прогнозирования при порождении и выборе альтернатив.

Для этого синтезируем структуру ИУС в соответствии с ее классификацией в терминах общей теории управления, свойствами регулирования объекта управления (ОУ),

¹Касперович С.А. Прогнозирование и планирование экономики: курс лекций для студентов. Минск: БГТУ, 2007. 172 с.

функциональным набором описания процессов преобразования потоков информации для целей регулирования. При этом оценим возможность ее реализации в рамках известных решений.

Цель функционирования адаптивно-ландшафтной системы земледелия – производство продукции экономически и экологически обусловленного количества и качества в соответствии с общественными (рыночными) потребностями, природными и производственными ресурсами при обеспечении устойчивости агроландшафта и воспроизводства почвенного плодородия [1].

Достижение этой цели требует управления комплексом взаимосвязанных агротехнических, мелиоративных и организационных мероприятий, составляющих суть агротехнологий.

Отметим, что параметры почвы, культуры и экологии имеют стохастический характер и определяются в основном климатическими условиями и интенсивностью солнечной радиации. Кроме того, свойства ОУ зависят от агроклиматической зоны участка агроландшафта, определяющего адаптационные механизмы функционирования ИУС.

Поэтому в целом систему управления можно отнести к классу систем адаптивного управления с прогнозированием многомерным динамическим стохастическим объектом [2] с возможностью изменять параметры или структуру регулятора в зависимости от параметров ОУ или внешних возмущений².

Структура ИУС базируется на аналитических моделях, описывающих физические процессы в ОУ, и математической модели вычисления управляющих воздействий на ОУ для достижения цели управления.

В математическом моделировании процессов агроэкосистемы можно выделить основные направления в классе имитационных моделей [3, 4]:

– эмпирический подход с широким использованием эвристического описания опреде-

ляющих процессов (применяются регрессионные соотношения, уравнения аллометрии, многочисленные функции стресса и т.п.);

– функциональный или теоретический (механистический или экофизиологический) подход с рассмотрением сущности процессов и причинно-следственных связей в агроэкосистеме с описанием их динамики на основе физически интерпретируемых зависимостей.

Аналитическое описание процессов агробIOSистемы на современном уровне базируется на компартментальном подходе³. При этом предполагается, что в пределах объема компартмента процессы не являются функцией пространственной переменной, поэтому допускается описание в виде обыкновенных дифференциальных уравнений. Такой подход используется для исследования процессов переноса вещества и энергии внутри живой системы и обмена их со средой, в частности, в системе почва – растительный покров – приземный слой воздуха. Структура аналитического описания биофизических процессов базируется на основе функционального (теоретического) динамического имитационного моделирования и представляется в виде взаимосвязанных компартментов. Использование эмпирических имитационных моделей неприемлемо, поскольку смена культуры или природно-климатической зоны потребует разработки новой эмпирической модели. В случае компартментального подхода физическая сущность процессов ОУ остается неизменной при изменении параметров ОУ, что определяет вариабельность имитационной модели.

Определим структуру ИУС адаптивного управления с прогнозированием возделывания зерновых культур с позиции функциональных преобразований информационного потока. Отметим свойства процесса регулирования ОУ, определяемые декомпозицией главной цели:

– управление имеет две цели управления: управление устойчивостью, поддержанием

²Адаптивное управление. URL: <https://ru.wikipedia.org/>

³Новосельцев В.Н. Теория управления и биосистемы. Анализ сохранительных свойств. М.: главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1978. 320 с.

плодородия почвы и экологии в севообороте (цель управления 1) и управление агроценозом культуры, в том числе изменение состояния почвы, экологии посевов (цель управления 2) и, в соответствии с этим, два контура управления с периодами управления, равными периоду полной ротации севооборота и сезону возделывания культуры;

– прогнозирование управления осуществляется выбором альтернативы из $k1 = 0, \dots, N1$, $k2 = 0, \dots, N2$ номеров альтернатив агротехнологий и из $k3 = 0, \dots, N3$, $k4 = 0, \dots, N4$ номеров альтернатив состава машинно-тракторного парка (МТП), соответственно контура управления 1, 2 в соответствии с критериальной функцией и их адаптированности зональным условиям применения.

Эффективность управления для практических целей можно оценить показателем эколого-экономической эффективности $\Xi_{\text{эобщ}}$, отражающим величину чистого дохода (или прибыли) с учетом предотвращенного экологического ущерба [1] по формуле

$$\Xi_{\text{эобщ}} = \frac{B_{\text{п}} - Z_{\text{п}} - (Y - K \cdot Z_{\text{у}})}{Z_{\text{э}}}, \quad (1)$$

где $B_{\text{п}}$ – стоимость валовой продукции; $Z_{\text{п}}$ – производственные затраты; Y – величина эколого-экономического ущерба сельскохозяйственного производства; K – коэффициент эффективности природоохранных мероприятий; $Z_{\text{у}}$ – затраты, направленные на предупреждение и ликвидацию ущерба в сельском хозяйстве; $Z_{\text{э}}$ – затраты, обеспечивающие эколого-экономический эффект, включая и природоохранные мероприятия.

С учетом массива альтернатив критериальная функция управления будет иметь вид

$$\Phi = \max_{\substack{0 \leq k1 \leq N1 \\ 0 \leq k2 \leq N2}} \left\{ \frac{B_{\text{п}k1, k2} - \min_{0 \leq k3 \leq N3} (Z_{\text{нпс}k1, k3}) - \min_{0 \leq k4 \leq N4} (Z_{\text{нпк}k2, k4} + Z_{\text{нак}k2, k4})}{(\min_{0 \leq k3 \leq N3} (Z_{\text{эпс}k1, k3} / N_{\text{пс}}) + \min_{0 \leq k4 \leq N4} (Z_{\text{эпк}k2, k4} + Z_{\text{эак}k2, k4}))} \right\}, \quad (2)$$

где $Z_{\text{нпс}k1, k3}$, $Z_{\text{нпк}k2, k4}$, $Z_{\text{нак}k2, k4}$ – эколого-экономические затраты альтернативной агротехнологии, включая затраты на выполнение операций агротехнологии агрегатами из альтернативных наборов МТП; $Z_{\text{эпс}k1, k3}$, $Z_{\text{эпк}k2, k4}$, $Z_{\text{эак}k2, k4}$ – затраты, обеспечившие эколого-экономический эффект, включая природоохранные мероприятия при изменении состояния почвы в цикле севооборота (индексы пс , $k1$, $k3$) соответственно, при изменении состояния почвы при управлении агроценозом культуры (индексы пк , $k2$, $k4$) и при изменении состояния культуры (индексы ак , $k2$, $k4$); $N_{\text{пс}}$ – число периодов ротации севооборота.

Функциональные преобразования информационного потока в системе управления с прогнозированием рассмотрим с позиций элементов теории множеств. Информационный поток представим множеством параметров вида $v = \{v_1(t), \dots, v_n(t)\}$, где $v_n(t)$ – элемент множества (параметр), описывающий состояние системы в момент времени t и имеющий функциональные отношения f с множеством w : $w = f\{v\}$. В общем случае f – функционал (любое отображение из произвольного множества в произвольное), оператор – отображение, ставящие в соответствие функции другую функцию. Тогда преобразования информационного потока можно описать следующим образом:

а) $a, b, c, d, a_p, b_p, c_p, d_p, a_t, b_t, c_t, d_t$, где a, b – множества параметров почвы, обеспечивающие устойчивость, плодородие и экологию в цикле севооборота и сезона соответственно, c – состояние агроценоза культуры, d – климатические условия, при этом индекс $*p, *t$ определяет прогнозируемые и текущие множества параметров;

б) множества параметров агротехнологии поддержания плодородия почвы альтернативы $k1$ и агроценоза культуры $k2$ определяются соответственно функционалами с учетом набора МТП mtp_{k1}, mtp_{k2} : $AT_{\text{пс}, k1} = f_{\text{атпс}}\{a, b, c, d, mtp_{k1}\}$, $AT_{\text{ак}, k2} = f_{\text{атак}}\{a, b, c, d, mtp_{k2}\}$, множества параметров агрегатов для осуществления технологических операций определяются функционалами $mtp_{\text{пк}k1} = f_{\text{умтпс}}\{AT_{\text{пс}, k1}\}$ и $mtp_{\text{пк}k2} = f_{\text{умтак}}\{AT_{\text{ак}, k2}\}$. Прогнозируемые множе-

ства параметров состояния объекта, урожайности и параметр устойчивости и сохранения плодородия почвы вычисляются операторами:

$$\begin{aligned}a_p &= A_{Ta_{k1}, k2}(a, b), \\b_p &= A_{Tb_{k1}, k2}(a, b), \\c_p &= A_{TC_{k1}, k2}(a, b, c), \\c_p &= A_{TC_{k1}, k2}(a_p, b_p, c_p), \\W_a &= A_{Tow}\{AT_{ps, k1}, AT_{ps, k2}\},\end{aligned}$$

взаимосвязанные функционально с параметрами агротехнологий:

$$\begin{aligned}A_{Ta_{k1}, k2} &= f_{oa}\{AT_{ps, k1}, AT_{ak, k2}\}, \\A_{Tb_{k1}, k2} &= f_{ob}\{AT_{ps, k1}, AT_{ak, k2}\}, \\A_{TC_{k1}, k2} &= f_{oc}\{AT_{ps, k1}, AT_{ak, k2}\}, \\A_{TC_{k1}, k2} &= f_{oc}\{AT_{ps, k1}, AT_{ak, k2}\}, \\A_{Tow} &= f_{ow}\{AT_{ps, k1}, AT_{ak, k2}\}.\end{aligned}$$

Значения множеств параметров воздействий на почву и экологию почвы в цикле севооборота, сезона, агроценоза и экологию культуры определяются соответственно функционалами:

$$\begin{aligned}U_{ps} &= f_{ups}\{AT_{ps, k1}\}, \\U_{es} &= f_{ues}\{AT_{ps, k1}\}, \\U_{pk} &= f_{upk}\{AT_{ak, k2}\}, \\U_{ak} &= f_{uak}\{AT_{ak, k2}\}, \\U_{ek} &= f_{uek}\{AT_{ak, k2}\},\end{aligned}$$

а множество параметров агрегатов для осуществления технологических операций в цикле ротации севооборота и сезона определяется функционалами:

$$mtp_{pk1} = f_{umtps}\{AT_{ps, k1}\} \text{ и } mtp_{pk2} = f_{umtak}\{AT_{ak, k2}\}.$$

Перечисленный набор функций и операторов, используя системный подход [5], можно представить в виде иерархической структуры системы управления объектом, представленной на рисунке. Управление осуществляется следующими действиями:

– для заданной районированной зоны участка агроландшафта (агротехнологического вида и типа земель), типа севооборота, посевной культуры, прогнозируемых климатических условий и базовым набором МТП

синтезируется набор из $k1, k2$ прогнозируемых к применению функций. Возможен выбор из известных значений, соответствующих функционалам $f_{atps}, f_{oa}, f_{ups}, f_{ues}, f_{umtps}, f_{atak}, f_{ob}, f_{uak}, f_{uek}, f_{umtpk}, f_{oc}$, определяемых в том числе типом агротехнологии (экстенсивные, нормальные, интенсивные, высокоинтенсивные) с учетом состояния объекта управления, определяемого множеством параметров a, b, c, d_p , МТП. При этом генерируется необходимый набор функций, связывающих выходные и входные множества параметров данного функционала;

– вычисляется множество параметров прогнозируемых агротехнологий поддержания плодородия почвы в цикле севооборота AT_{ps} , агроценоза культуры AT_{ak} ;

– синтезируются операторы преобразования множества параметров или выбираются из известных $A_{Ta_{k1}, k2}, A_{Tb_{k1}, k2}, A_{TC_{k1}, k2}$, множества параметров базового набора МТП mtp_{pk1}, mtp_{pk2} , прогнозируемых для проведения необходимых операций на поле;

– вычисляются прогнозируемые множества параметров плодородия почвы и агроценоза культуры объекта управления a, b, c операторами преобразования;

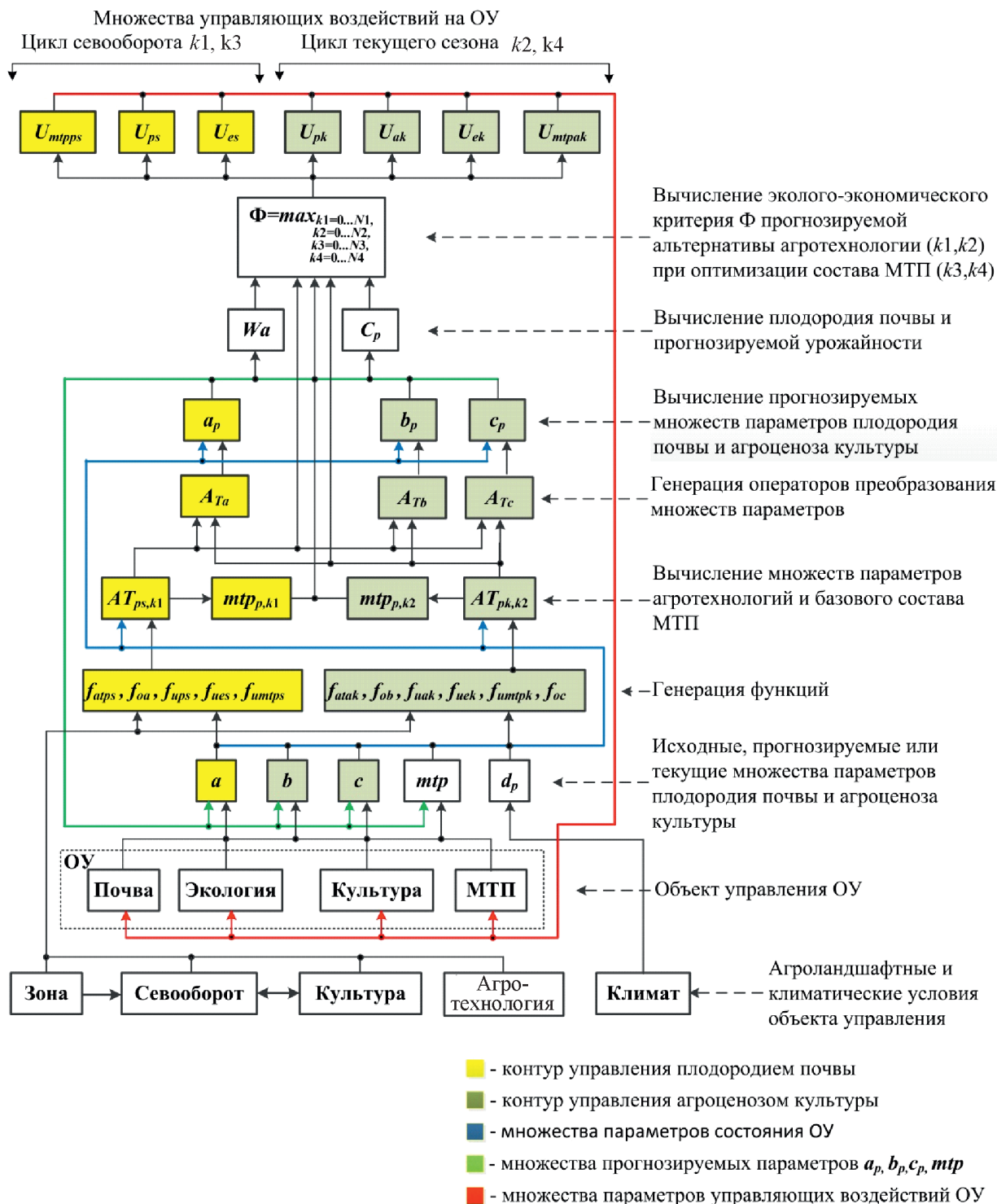
– вычисляются условия плодородия почвы W_a и прогнозируемой урожайности C_p ;

– при выполнении условия плодородия почвы $W_a \geq 0$ вычисляют эколого-экономические затраты, множество параметров агрегатов для осуществления технологических операций $U_{mtp_{ps, k1, k3}}, U_{mtp_{ak, k2, k4}}$ и значение эколого-экономического критерия Φ по выражению (2);

– осуществляется поиск альтернативного варианта $k1, k2, k3, k4$ агротехнологий, соответствующий максимальному значению эколого-экономического критерия Φ ;

– значения множества параметров воздействий на почву и экологию почвы в цикле севооборота, сезона и агроценоза и экологию культуры определяются соответственно функционалами $U_{mtps}, U_{ps}, U_{es}, U_{pk}, U_{ak}, U_{ek}, U_{mtpak}$;

– отклонение прогнозируемого состояния объекта управления от фактического определяется в соответствии с циклом управле-



Иерархическая структура системы управления объектом с прогнозированием
Hierarchical structure of the object management system with forecasting

ния. При этом рассчитывается фактическое значение эколого-экономического критерия Φ и корректируется процедура генерации функций в системе управления для минимизации отклонений в следующем цикле управления.

Оценим возможность реализации синтезированной структуры ИУС с прогнозированием (далее ИУС) известными решениями в области информационных технологий и математического моделирования агроэкологических задач (см. рисунок). Проведен обзор информационных источников⁴ [6].

К системе управления, основанной на эвристических моделях, относится например, многоуровневая модель интеллектуального управления агротехнологическим процессом в биопроизводственной системе [7]. Она базируется на эвристической коррекции математических моделей агроэкосистем эвристическими знаниями земледельцев. Система "Эйдос-Х++" основана на системно-когнитивной статистической взаимосвязи искомым параметров по известному множеству реализаций агротехнологического процесса. Применение этой системы ограничено знанием реальной статистики истории применения агротехнологий за длительный период времени [8]. Такая информация в большинстве случаев в хозяйствах отсутствует.

Другие известные методы или математические модели описывают отдельные процессы агробiosистемы без описания их взаимосвязи. Такими системами являются модели определения оптимальных доз удобрений⁵

и динамики гумуса [9], автоматизированный банк моделей плодородия «ПЛОМОД»⁶, в которых взаимосвязь параметров севооборота с состоянием плодородия и экологии почвы определяется в основном на уровне методологий и относится к категории знания [10]. Эти методы не могут быть применены в ИУС без доработки аналитического описания процессов взаимосвязи в рамках компартментального подхода.

Заслуживают внимание математические модели процессов, несвязанные с агроценозом культуры или модели оценки результатов. Это агрометеорологическая информационно-прогностическая система ИПС Всероссийского научно-исследовательского института сельскохозяйственной метеорологии (ВНИИСХМ) на основе синоптико-статистического метода⁷, математические модели и алгоритмы прогнозной оценки урожайности зерновых культур с использованием спутниковых данных (модель EPIC)⁸, оценка устойчивости органического вещества почвы на основе математической теории катастроф [11, 12], оптимизация состава МТП⁹ [13, 14]. Такие модели могут быть применены в структуре ИУС при их доработке.

Известны системы имитации биофизических процессов, базирующиеся на функциональном (теоретическом) динамическом имитационном моделировании процессов агробiosистемы в рамках компартментального подхода. Это системы WOFOST¹⁰ (Нидерланды), DSSAT – The Decision Support System for Agrotechnology Transfer¹¹, DSSAT

⁴Хомяков Д.М., Искандарян Р.А. Информационные технологии и математическое моделирование в задачах природопользования. URL: <http://fadr.msu.ru/rin/ecol/model.htm>

⁵Арланцева Е.Р. Математическое обеспечение поддержки принятия решений для оптимизации интенсивности растениеводства : автореф. дис. ... канд. экон. наук : 08.00.13. МСХА имени К.А. Тимирязева, каф. экономической кибернетики. М., 2008.

⁶Фрид А.С. Банк моделей плодородия "ПЛОМОД". URL: <http://www.esoil.ru/databases/bank.html>

⁷Лебедева В.М. Синоптико-статистический метод прогноза. URL: <http://cxm.obninsk.ru/index.php?id=157>

⁸Брыксин В.М. Разработка математической модели и программных средств оценки урожайности зерновых культур в условиях Западной Сибири: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18. Барнаул, 2009. 22 с.

⁹Артемов Ю.Г. Повышение эффективности производства сельхозпродукции в условиях Ленинградской области путем оптимизации ресурсного обеспечения и состава машинно-тракторного парка: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. Санкт-Петербург; Павловск, 2013, с. 19.

¹⁰Hadiya N., Kumar N., Mote B.M. Use of WOFOST model in agriculture-A review- URL: https://www.researchgate.net/publication/327098320_Use_of_WOFOST_model_in_agriculture-A_review

¹¹Jones J.W. Hoogenboom G., Porter C.H., Boote K.J., Batchelor W.D., Hunt L.A., Wilkens P.W., Singh U., Gijsman A.J., Ritchie J.T. The DSSAT cropping system model // European Journal of Agronomy. 2003. № 18 (3–4). С. 235–265.

Cropping System (CSM)¹², проект IBNSAT (США), система моделирования APSIM – Agricultural Production Systems SIMulator¹³, (Австралия) и модель продуктивности посевов AGROTOOL (Россия) [15]. Эти модели являются полуэмпирическими, имеют сходную структуру и различаются в основном номенклатурой и деталями описания отдельных блоков. Данные системы не являются системами управления, поскольку реализуют моделирование процессов почва – приземный слой воздуха – растение без учета процессов адаптивного управления с прогнозированием.

Рассмотрим реализацию структуры ИУС с учетом модели продуктивности посевов AGROTOOL, включающей описание следующих процессов, имеющих место в системе почва – растительный покров – приземный слой воздуха:

- компартмент почва – динамика почвенной влаги, динамика соединений азота в почве, рост и развитие корневой системы;

- компартмент приземный слой воздуха – режимы посева, фотосинтеза и фотодыхания, транспирации растений и испарения влаги с поверхности почвы, выбор норм и сроков орошения в поливном земледелии;

- компартмент растение – влагоперенос в растение, рост и развитие растений (надземные органы), прогнозирование урожая (начиная с фазы колошения).

Структуру ИУС представим в виде набора компартментов, аналитически описывающих функциональные преобразования потока информации: устойчивость и плодородие почвы $f_{alps}, f_{oa}, A_{Ia_{k1}, k2}$, агроценоз культуры $f_{alpk}, f_{ob}, f_{oc}, f_{oc}, A_{Tb_{k1}, k2}, A_{Tc_{k1}, k2}, A_{TC_{k1}, k2}$, формирование прогнозируемых параметров a_p, b_p, c_p .

При этом процессы агроценоза культуры и прогнозируемых при этом параметров почвы, культуры могут быть представлены аналогичными компартментами почва – рас-

тительный покров – приземный слой воздуха системы AGROTOOL. Остальные процессы функциональных преобразований потока информации в ИУС и условий осуществления управления не имеют аналогов в компартментальной структуре системы AGROTOOL. Поэтому компартменты ИУС должны дополнительно содержать аналитическое описание следующих процессов и условий осуществления управления:

- компартмент почва – устойчивость и плодородие почвы, формирование прогнозируемого множества параметров почвы, взаимосвязь параметров почвы с циклом севооборота;

- дополнительный компартмент экология почвы и растения – взаимосвязь параметров интенсивности планируемой агротехнологии с параметрами почвы.

- условия осуществления управления – формирование альтернативного варианта агротехнологии, содержащего планируемые операции на поле и состав МТП, может осуществляться в соответствии с федеральным (региональным) регистром агротехнологий.

Временная привязка операции на поле, объем удобрений определяется по результатам прогона математических моделей ИУС. Адаптация управления по типам севооборота и почвенно-климатической зоне участка агроландшафта может осуществляться настройкой аналитического содержания компартментов параметрами ОУ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного анализа информационных материалов установлено, что аналитическое описание процессов агросистемы на современном уровне базируется на компартментальном подходе, использующем методы функционального (теоретического) динамического имитационного моделирования. Применение эмпирических моделей неприемлемо, поскольку смена культуры или природно-климатиче-

¹²Keating B.A. Modelling crops and cropping systems – Evolving purpose, practice and prospects. European Journal of Agronomy. 2018. Vol. 100. P. 163-176.

¹³Keating B.A., Carberry P.S., Hammer G.L. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation // European journal of Agronomy. 2003. N 18. P. 267-288.

ской зоны требует разработки новой модели с включением стадий исследования и верификации.

Синтез структуры информационно-управляющей системы производился при ограничении области управления участком агроландшафта (поле) с заданной системой севооборота и сезонным характером управляющих воздействий. Сезонный характер управляющих воздействий и смена природно-климатической зоны определяют класс информационно-управляющей системы как система адаптивного управления с прогнозированием.

Информационно-управляющая система имеет два контура управления: первый – поддержание плодородия почвы и экологии в севообороте, второй – агроценоз культуры, в том числе изменение состояния почвы, экологии посевов.

На основе функционального преобразования информационного потока синтезирована иерархическая структура информационно-управляющей системы, функционалы которой в части описания процессов в объекте управления могут быть представлены в виде компартиментов. По результатам информационного обзора реализация подобной информационно-управляющей системы не выявлена. Рассмотрена возможность реализации разработанной структуры информационно-управляющей системы с учетом систем имитации биофизических процессов WOFOST, DSSAT, DSSAT Cropping System (CSM), APSIM и AGROTOOL, использующих методы функционального (теоретического) динамического имитационного моделирования в рамках компартиментального подхода.

Проведен сравнительный анализ состава компартиментов, необходимых для аналитического описания функционалов процессов в объекте управления структуры информационно-управляющей системы и системы AGROTOOL. Установлено, что процессы агроценоза культуры и прогнозируемых параметров почвы, культуры могут быть представлены аналогичными компартиментами почва – растительный покров – приземный

слой воздуха системы AGROTOOL. При этом структура ИУС должна содержать дополнительно, как минимум, аналитическое описание следующих процессов и условий осуществления управления:

- компартимент почва – устойчивость и плодородие почвы, формирование прогнозируемого множества параметров почвы, взаимосвязь параметров почвы с циклом севооборота;

- дополнительный компартимент экология почвы и растения – взаимосвязь параметров интенсивности планируемой агротехнологии с параметрами почвы;

- условия осуществления управления определяются алгоритмом формирования альтернативного варианта агротехнологии, содержащего планируемые операции на поле, объем удобрений и состав машинно-тракторного парка, и алгоритмом адаптации аналитического содержания компартиментов типам севооборота и почвенно-климатической зоны участка агроландшафта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Киришин В.И.* Теория адаптивно-ландшафтного земледелия и проектирование агроландшафтов. М.: КолосС, 2011. 442 с.
2. *Чаки Ф.* Современная теория управления // Нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. М.: Мир, 1975. 422 с.
3. *Баденко В.Л., Топаж А.Г., Якушев В.В., Мишель В., Нендель К.* Имитационная модель агроэкосистемы как инструмент теоретических исследований // Сельскохозяйственная биология. 2017. Т. 52. № 3. С. 437–445.
4. *Топаж А.Г.* Динамические модели продуктивности: тупик или распыть? // Математические модели природных и антропогенных экосистем. СПб.: АФИ, 2014. С. 48–49.
5. *Свиридов В.И., Комов В.Г.* Эффективность системных методов при разработке адаптивно-ландшафтных систем земледелия // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 6. С. 39–41
6. *Хворова Л.А., Брыксин В.М., Гавриловская Н.В., Топаж А.Г.* Математическое моделирование и информационные технологии в экологии и природопользовании: монография. Барнаул: Издательство Алтайского государственного университета, 2013. 277 с.

7. Клачек П.М., Корягин С.И., Лизоркина О.А. Интеллектуальная системотехника: монография. Калининград: издательство Балтийского федерального университета им. И. Канта, 2015. 214 с.
8. Горпинченко К.Н., Луценко Е.В. Прогнозирование и принятие решений по выбору агротехнологий в зерновом производстве с применением методов искусственного интеллекта (на примере СК-анализа): монография. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет, 2013. 168 с.
9. Морозов А.И., Самойлова Е.М. О методах математического моделирования динамики гумуса // Почвоведение. 1993. № 6. С. 24–32.
10. Шеин Е.В. Математические физически обоснованные модели в почвоведении: история развития, современное состояние, проблемы и перспективы (аналитический обзор) // Почвоведение. 2015. № 7. С. 816–823.
11. Давлетишина М.Р. Анализ устойчивости почвенной системы с использованием аппарата теории катастроф // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2009. Т. 11. № 1 (7). С. 1435–1439.
12. Рыжова И.М. Анализ устойчивости почв на основе теории нелинейных динамических систем // Почвоведение. 2003. № 5. С. 583–590.
13. Зубина В.А. Обзор и анализ методов оптимизации и компьютерных программ для повышения эффективности машинно-тракторного парка // Вестник аграрной науки Дона. 2018. № 1 (41). С. 26–32.
14. Исакова С.П., Лапченко Е.А. Web-комплекс на базе математической модели формирования оптимального машинно-тракторного парка // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2016. № 5. С. 76–82.
15. Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. СПб.: издательство Санкт-Петербургского государственного университета, 2006. 396 с.
2. Csaki F. Modern control theories. *Nonlinear, optimal and adaptive systems*. Moscow, Mir Publ., 1975. 422 p. (In Russian).
3. Badenko V.L., Topazh A.G., Yakushev V.V., Mirshel' V., Nendel' K. Crop models as research and interpretative tools. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya = Agricultural Biology*, 2017, vol. 52, no. 3, C. 437–445. (In Russian).
4. Topazh A.G. *Dynamic Productivity Models: Dead End or Crossroads? Mathematical models of natural and anthropogenic ecosystems*. St. Petersburg, AFI Publ., 2014, C. 48–49. (In Russian).
5. Sviridov V.I., Komov V.G. The effectiveness of system methods in the development of adaptive landscape farming systems. *Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Vestnik of Kursk State Agricultural Academy*, 2014, no. 6, pp. 39–41. (In Russian).
6. Khvorova L.A., Bryksin V.M., Gavrilovskaya N.V., Topazh A.G. *Mathematical modeling and information technology in ecology and nature management*. Barnaul, Altai State University Publishing House, 2013, 277 p. (In Russian).
7. Klachek, P.M., Koryagin S.I., Lizorkina O.A. *Intelligent systems engineering*. Kaliningrad, Publishing House of I. Kant Baltic Federal University, 2015, 214 p. (In Russian).
8. Gorpinchenko K.N., Lutsenko E.V. *Forecasting and decision-making on the choice of agricultural technologies in grain production using artificial intelligence methods (on the example of SK analysis)*. Krasnodar, Kuban State Agrarian University, 2013, 168 p. (In Russian).
9. Morozov A.I., Samoilova E.M. Methods of mathematical modeling of humus dynamics. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*, 1993, no. 6, pp. 24–32. (In Russian).
10. Shein E.V. Physically based mathematical models in soil science: history, current state, problems and outlook (analytical review). *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*, 2015, no. 7, pp. 816–823. (In Russian).
11. Davletshina M.R. The analysis of stability of soil system by the theory of accidents. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2009, vol. 11, no. 1 (7), pp. 1435–1439. (In Russian).
12. Ryzhova I.M. Analysis of soil stability on the basis of nonlinear dynamic models. *Pochvo-*

REFERENCES

- vedenie = *Eurasian Soil Science*, 2003, no. 5, pp. 583–590. (In Russian).
13. Zubina V.A. Review and analysis of optimization methods and computer programs to increase the efficiency of the machine and tractor fleet. *Vestnik agrarnoi nauki Dona = Don Agrarian Science Bulletin*, 2018, no. 1 (41), pp. 26–32. (In Russian).
14. Isakova S.P., Lapchenko E.A. Web complex based on mathematical model to form optimal machine-and-tractor fleet. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki = Siberian Herald of Agricultural Science*, 2016, no. 5, pp. 76–82. (In Russian).
15. Poluektov R.A., Smolyar E.I., Terleev V.V., Topazh A.G. *Models of the production process of agricultural crops*. St. Petersburg, Publishing House of St. Petersburg State University, 2006, 396 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

✉ **Нечаев А.И.**, старший научный сотрудник; **адрес для переписки:** Россия, 630501, Новосибирская область, р.п. Краснообск; СФНЦА РАН, а/я 463; e-mail: netaew@mail.ru

AUTHOR INFORMATION

✉ **Alexander I. Nechaev**, Senior Researcher; **address:** PO Box 463, SFSCA RAS, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, 630501, Russia; e-mail: netaew@mail.ru

Дата поступления статьи / Received by the editors 22.01.2021
Дата принятия к публикации / Accepted for publication 01.04.2021
Дата публикации / Published 25.05.2021