

УДК 632.5

СТРАТЕГИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ АГРОЦЕНОЗОВ

© 2022 г. И. М. Михайленко^{1,*}, В. Н. Тимошин¹¹ *Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия***E-mail: Iya.mihailenko@yandex.ru*

Поступила в редакцию 19.08.2021 г.

После доработки 17.09.2021 г.

Принята к публикации 15.12.2021 г.

Разработаны теоретические основы решения задачи управления состоянием агроценозов, в состав которых входят посевы основной культуры и сорные растения. Решение этой задачи направлено на устранения ограниченности существующей парадигмы раздельного управления состоянием посевов культур и сорной растительности. Внесение минеральных удобрений одновременно стимулирует рост и развитие культурных и сорных растений, а обработки гербицидами одновременно подавляют рост как культур, так и сорных растений. В результате это приводит к существенным потерям урожая и перерасходу удобрений и гербицидов. Предложенная теория и методика основана на учете взаимосвязи состояния посевов культур и сорных растений, и их общее влияние на содержание элементов питания в почве. Для этого предложена система математических моделей, в которых учтены эти взаимосвязи и потери урожая при отклонениях параметров химического состояния почвы от оптимальных показателей для культур севооборота и от влияния обработок гербицидами на посевы культур. Результатом решения задачи являются оптимальные стратегии внесения минеральных удобрений, мелиорантов и гербицидов в годы севооборота. Эти стратегии обеспечивают минимизацию потерь урожая всех культур севооборота и расхода агрохимикатов. Они являются основным инструментом планирования агротехнологий и нормирования технологических операций, реализуемых в отдельные годы севооборота. Полученные результаты являются новыми, т.к. в настоящее время такой инструментарий отсутствует.

Ключевые слова: агроценоз, культура, сорные растения, удобрения, гербициды, стратегическое управление.

DOI: 10.31857/S0002188122030073

ВВЕДЕНИЕ

Переход на цифровизацию и интеллектуализацию сельского хозяйства прежде всего связан с необходимостью автоматизации процессов управления агротехнологиями в точном земледелии (ТЗ). В то же время проблема автоматизации управления агротехнологиями связана с неразвитостью теоретической базы в этой области науки. Отсутствие эффективной теории управления привело к тому, что современная техника ТЗ обладает низкой экономической отдачей, т.к. не обладает эффективными средствами автоматического управления. В то же время при создании такой теории необходимо иметь в виду, что в современной аграрной науке сложилась парадигма раздельного управления состоянием посевов культур за счет оптимизации доз минеральных удобрений и сорных растений — за счет обработки их гербицидами или механических обработок

почвы. При этом не принимается во внимание тот факт, что и культуры, и сорные растения произрастают вместе в составе единого агроценоза, а минеральные удобрения влияют на состояние как культурных, так и сорных растений, а гербициды угнетают не только сорняки, но и посевы возделываемых культур.

В части управления агротехнологиями возделывания культур была разработана общая концепция, согласно которой общая задача управления разделяется на 4 уровня управления, реализуемые в годовом, суточном и часовом масштабе времени [1]. Для каждого уровня была разработана теория управления и апробированы алгоритмы управления, которые могут стать теоретической базой для современных систем ТЗ. Однако такая концепция направлена только на управление состоянием культур и не учитывает тот факт, что в составе агроценоза присутствуют сорные расте-



Рис. 1. Компоненты стратегии борьбы с сорными растениями.

ния, конкурирующие с растениями основного посева за питание и влагу. При этом вынос влаги и элементов питания сорными растениями может превышать вынос культурными растениями, что уменьшает их урожайность до 50%.

Контроль популяции сорных трав (особенно многолетних) является сложной задачей, поэтому для ее решения обычно применяют системный подход, который объединяет несколько управленческих компонентов (мероприятий) в единую стратегию (рис. 1). Эффективная система подавления многолетних сорняков направлена на снижение содержания углеводов в тканях растений, поэтому одним из методов воздействия является механическая обработка почвы. Однако уничтожение и подавление сорняков одними агротехническими методами не дает желаемых результатов. Поэтому для подавления и уничтожения многих видов сорняков широко используют гербициды. По характеру поражения растений гербициды условно делят на гербициды сплошного действия и гербициды избирательного действия. Гербициды избирательного действия составляют наибольшую группу из применяемых в практике земледелия. Они минимально повреждают возделываемые культуры, но уничтожают или подавляют развитие определенных видов сорных растений [2]. Подразделение гербицидов на общеистребительные и избирательные является условным также и потому, что гербициды сплошного действия, чаще используемые в форме добавок в небольших дозах к другим соединениям, применяют в качестве препаратов избирательного действия.

Наличие в составе агроценозов однолетних и многолетних сорных растений значительно усложняет общую задачу управления, что указывает на то, что и в этом случае целесообразна декомпозиция сложной задачи на отдельные уровни управления в соответствии с ранее разработанной концепцией.

Цель работы – дальнейшее развитие стратегического уровня управления агротехнологиями с учетом параметров состояния посевов основных культур в составе севооборотов и многолетних сорных растений [3].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Сначала введем ряд условий и допущений, при которых решается рассматриваемая задача:

- среди всех возможных методов подавления сорной растительности рассматривается только химический метод, где используются гербициды;
- задача решается для выбранного севооборота;
- параметры всех используемых математических моделей априорно известны, т.е. они оценены заранее путем проведения идентификационных экспериментов;
- для каждой культуры используемого севооборота известно оптимальное содержание основных элементов питания и оптимальная величина показателя кислотности;
- снижение потенциального урожая культур происходит за счет отклонения содержания элементов питания растений (химических параметров состояния почвы) от оптимальных показателей, за счет использования гербицидов, а также за счет конкуренции культур с сорняками.

Вербально задача стратегического управления агроценозом формулируется следующим образом. Для последовательности культур в принятом севообороте, с обозначением отдельных культур индексами $j = 1, 2, 3 \dots, N$ найти стратегию внесения основных элементов питания, мелиорантов и обработок гербицидами на заданном поле, обеспечивающую минимизацию потерь суммарного урожая всех культур севооборота, при минимальном расходе ресурсов и при заданных технологических ограничениях. Такими ограничениями могут быть допустимые по экологическим требованиям дозы удобрений, мелиорантов и гербицидов.

При решении задачи стратегического управления необходимо иметь в виду, что в годовом масштабе времени непрерывно изменяется только химическое состояние почвенной среды (ПС) и биомасса многолетних сорняков, а урожаи культур в отдельные годы представляют собой дискретную последовательность величин. При оптимальном сочетании параметров химического состояния ПС урожаи могут достигать своего потенциального уровня, обусловленного другими нерегулируемыми данной стратегией условиями возделывания культур. Для прогнозирования этой величины введем в рассмотрение вектор условий, нерегулируемых на данном уровне управления: $F = [4 \times 1]$, с компонентами: f_1 – сезонная сумма температур, f_2 – сезонная сумма осадков, f_3 – суммарный приток ФАР, f_4 – годовой расход доступных форм азота. Тогда потенциальные уровни урожая для отдельных культур можно определять по следующей математической модели:

$$u_j(T) = B_j^T F(T), \quad (1)$$

где $B_j^T = [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5]_j$ – вектор параметров линейной модели потенциального урожая.

При допущении о том, что для каждой культуры используемого севооборота известно оптимальное содержание основных элементов питания и оптимальная величина показателя кислотности, любое отклонение в большую или в меньшую сторону от этих оптимальных показателей приводит к потерям урожая. Кроме того, к дополнительным потерям урожая приводит применение гербицидов. С учетом того, что все вышеуказанные показатели химического состояния почвы действуют одновременно, то будем рассматривать следующую нелинейную форму модели потерь урожая каждой j -й культуры в севообороте:

$$\Delta u_j(T) = k_{1j}^T (V_j^* - V(T)) + (V_j^* - V(T))^T K_{2j} (V_j^* - V(T)) + k_{3j} g(T), \quad (2)$$

где V^* – оптимальная величина вектора химического состояния почвы на заданном поле для j -й культуры севооборота, $V(T)$ – прогнозная величина вектора химического состояния почвенной среды для T -го года севооборота, компонентами которого являются: $v_1 = \text{pH}$, $v_2 = \text{P}$, $v_3 = \text{K}$, $v_4 = \text{Mg}$, P – фосфор, K – калий, Mg – магний; $g(T)$ – прогнозные величины доз гербицидов, $T = 1, 2, \dots, N$ – индексы сельскохозяйственных сезонов во всем рассматриваемом интервале управ-

ления, $\Delta u_j(T)$ – потери урожая для j -й культуры T -го года севооборота, возникающие за счет отклонения вектора химического состояния почвы от оптимальной величины и применения гербицидов;

$k_{1j}^T = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4]_j$ – матрица-строка параметров линейной части модели, учитывающей влияние элементов питания;

$$K_{2j} = \begin{bmatrix} k_5 & k_6 & k_7 & k_8 \\ k_6 & k_9 & k_{10} & k_{11} \\ k_9 & k_{10} & k_{12} & k_{13} \\ k_8 & k_{11} & k_{13} & k_{14} \end{bmatrix}_j \quad \text{– матрица параметров}$$

квадратичной части модели;

$k_{3j} = k_{15j}$ – матрица-строка параметров линейной части модели, учитывающей влияние гербицидов.

Каноническая векторно-матричная форма модели (2) неудобна для идентификации, поэтому необходимо ее представить в линейной векторной форме, удобной для оценки неизвестных параметров по экспериментальным данным

$$\Delta u_j(T) = K_j^T Y_j,$$

$$K_j^T = [k_{1j} \ \dots \ k_{15j}],$$

$$Y^T = [k_5(v_1^* - v_1)k_6(v_2^* - v_2)k_7(v_3^* - v_3)k_8(v_4^* - v_4) \times \\ \times k_9(v_1^* - v_1)^2 k_{10}(v_1^* - v_1)(v_2^* - v_2) \times \\ \times k_{11}(v_1^* - v_1)(v_3^* - v_3)k_{12}(v_1^* - v_1)(v_4^* - v_4) \times \\ \times k_{13}(v_2^* - v_2)^2 k_{14}(v_2^* - v_2)(v_3^* - v_3) \times \\ \times k_{15}(v_2^* - v_2)(v_4^* - v_4)k_{16}(v_3^* - v_3)^2 \times \\ \times k_{17}(v_3^* - v_3)(v_4^* - v_4)k_{18}(v_4^* - v_4)^2 k_{19}g]. \quad (3)$$

При этом для идентификации модели (3) потребуется реально наблюдаемый выход, который формируется путем сравнения потенциального урожая для j -й культуры для заданных условий возделывания, определяемых вектором F , и прогнозируемого урожая $u_j(T)$ для этих же условий:

$$\Delta u_j(T) = B_j^T F(T) - u_j(T). \quad (4)$$

Поиск компромиссных решений по стратегиям внесения агрохимикатов, мелиорантов и обработок гербицидами возможен только при наличии прогнозов параметров химического состояния почвы и биомассы сорняков, по которым возможно прогнозировать суммарные потери урожая. Для этого необходимо введение динами-

ческих моделей всех параметров химического состояния почвы и общей биомассы многолетних сорняков:

$$\dot{v}_{1j} = a_{11}v_{1j}(T) + b_{11}d_{Ca}(T) + c_{12}f_2(T), \quad (5)$$

$$\dot{v}_{2j} = a_{22}v_{2j}(T) + b_{22}d_p(T) + c_{22}f_2(T) - d_2\hat{u}_j(T) - q_2s(T), \quad (6)$$

$$\dot{v}_{3j} = a_{33}v_{3j}(T) + b_{33}d_K(T) + c_{32}f_2(T) - d_3\hat{u}_j(T) - q_3s(T), \quad (7)$$

$$\dot{v}_{4j} = a_{44}v_{4j}(T) + b_{44}d_{Mg}(T) + c_{42}f_2(T) - d_4\hat{u}_j(T) - q_4s(T), \quad (8)$$

$$\dot{s} = a_{55}s(T) + a_{52}v_2(T) + a_{53}v_3(T) + a_{54}v_4(T) - b_g g(T) + c_{51}f_1(T) + c_{52}f_2(T) + c_{53}f_{53}(t), \quad (9)$$

где $v_1 = \text{pH}$, $v_2 = \text{P}$, $v_3 = \text{K}$, $v_4 = \text{Mg}$, P – фосфор, K – калий, Mg – магний, $s(T)$ – общая биомасса многолетних сорняков, $\hat{u}_j(T) = B_j^T F(T) - \Delta u_j(T)$ – урожай с учетом потерь культуры, $d_p(T)$, $d_K(T)$, $d_{Ca}(T)$, $d_{Mg}(T)$ – дозы внесения элементов питания и мелиоранта в годы севооборота (элементы стратегии), a_{11} – a_{44} , b_{11} – b_{44} , c_{12} – c_{42} , d_2 – d_4 , q_2 – q_4 – параметры модели.

Введенные обозначения и модели позволяют сформировать критерий оптимальности решения задачи, адекватный поставленной цели:

$$I = (V^* - V(N))^T G(V^* - V(N)) + M \left\{ \sum_{T=1}^N [c_{Tu}(k_1^T(V^* - V(T)) + (V^* - V(T))^T K_2(V^* - V(T)) + k_3g(T)) + C_d^T D(T) + c_g g(T)] \right\}, \quad (10)$$

где M – операция математического ожидания по площади поля, c_{Tu} – цена единицы урожая T -й культуры севооборота, C_d^T – вектор цен на минеральные удобрения по каждому элементу пита-

ния, c_g – цена на гербицид, $G = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_{55} \end{bmatrix}$ –

весовая матрица, конечных величин химических параметров почвы и биомассы многолетних сорняков.

В критерии (10) опущены индексы культур j , считая, что он совпадает с номерами лет севообо-

ротов T . Этот критерий включает в себя следующие компоненты: квадратичный штраф за отклонения параметров химического состояния от оптимальных показателей, чем неявно задаются ограничения на их допустимые величины, суммарные потери урожая всех культур севооборота, а также затраты на минеральные удобрения и гербициды. При таком составе компонентов критерий оптимальности имеет смысл среднего риска недополучения урожая в севообороте и перерасхода ресурсов, затрачиваемых на его получение. В качестве технологического ограничения на параметры химического состояния в этом случае рассматривается 20%-ное поле допуска показателя кислотности почвы вблизи оптимального показателя.

При использовании принципа максимума для решения задачи формирования оптимальных стратегий внесения удобрений и гербицидов в годы севооборота необходимо ввести в рассмотренные гамильтониан системы (5)–(10) [4]:

$$H(T) = C_d^T D(T) + c_{Tu}(V^* - V(T))^T K_2(V^* - V(T)) + k_3g(T) + c_g g(T) + \lambda_1(a_{11}v_1(T) + b_{11}d_{Ca}(T) + c_{12}f_2(T)) + \lambda_2(a_{22}v_2(T) + b_{22}d_p(T) + c_{22}f_2(T) - d_2\hat{u}_j(T) - q_2s(T)) + \lambda_3(a_{33}v_3(T) + b_{33}d_K(T) + c_{32}f_2(T) - d_3\hat{u}_j(T) - q_3s(T)) + \lambda_4(a_{44}v_4(T) + b_{44}d_{Mg}(T) + c_{42}f_2(T) - d_4\hat{u}_j(T) - q_4s(T)) + \lambda_5(a_{55}s(T) + a_{52}v_2(T) + a_{53}v_3(T) + a_{54}v_4(T) - b_g g(T) + c_{51}f_1(T) + c_{52}f_2(T) + c_{53}f_{53}(t)), \quad (11)$$

где λ_1 – λ_5 – сопряженные переменные задачи.

Весь алгоритм формирования стратегии внесения удобрений и обработки гербицидами включает в себя следующие шаги.

Шаг 0. Задается циклическая переменная $i = 0$. Задаются начальные условия для переменных системы моделей (5): v_{10} , v_{20} , v_{30} , v_{40} , s_0 ; начальные параметры стратегий внесения удобрений в годы севооборота: $d_{0P}(T)$, $d_{0K}(T)$, $d_{0Ca}(T)$, $d_{0Mg}(T)$, и годовых доз обработок гербицидом $g_0(T)$, $T = 1, 2, 3, 4, 5$.

Шаг 1. Решается система моделей (5)–(9), в результате получают решения для годов севооборота $v_{1i}(T)$, $v_{2i}(T)$, $v_{3i}(T)$, $v_{4i}(T)$, $s_i(T)$. Вычисляется критерий (10) I_i ; если $I_i \leq \delta$, то вычисления прекращаются, иначе осуществляется переход к шагу 2.

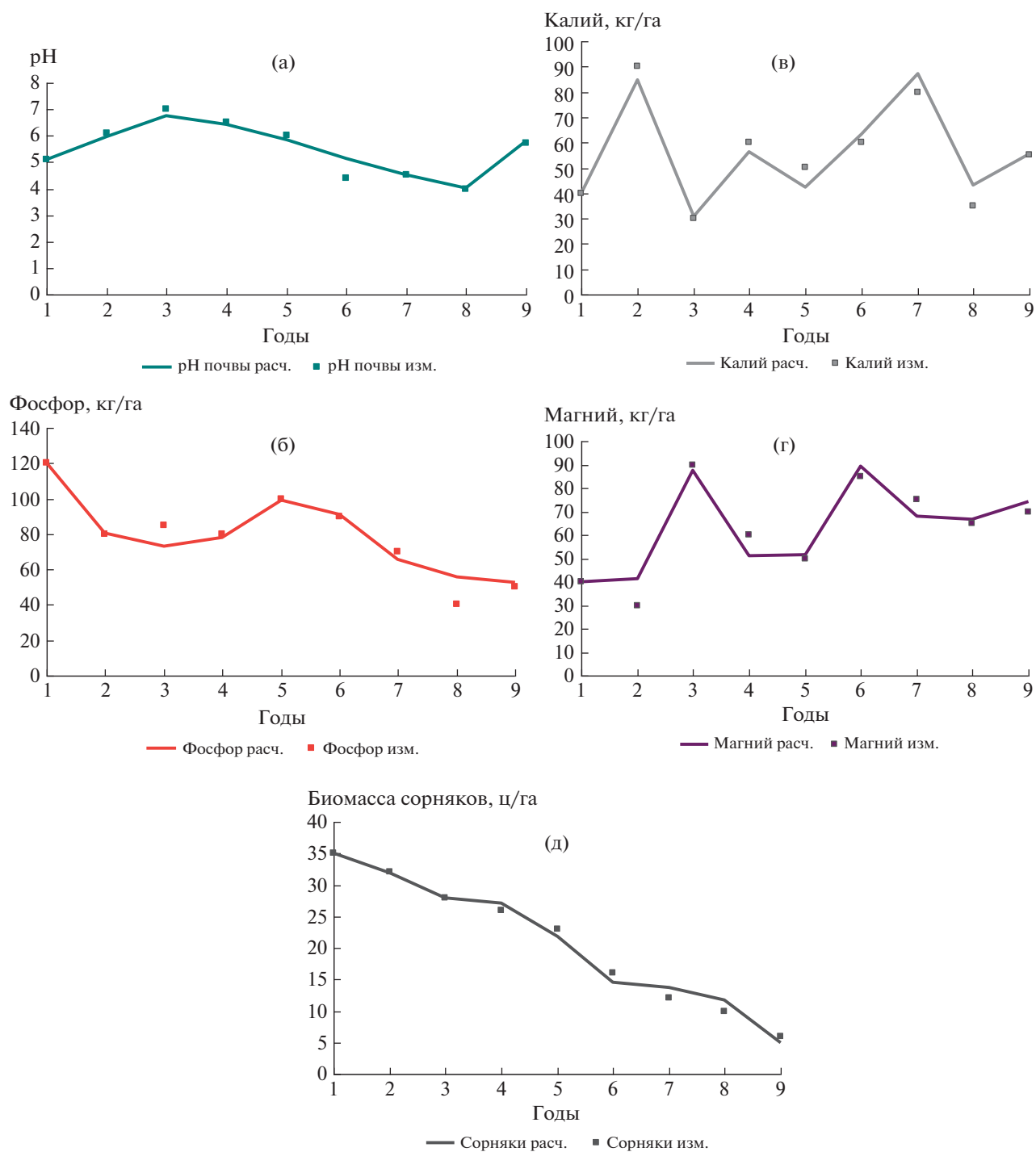


Рис. 2. Результаты идентификации моделей динамики показателей химического состояния почвы в годы севооборота: (а) – величины рН; содержания в почве доступных (б) – фосфора, (в) – калия, (г) – магния; (д) – общей биомассы многолетних сорняков.

Шаг 2. Решается система сопряженных переменных в обратном времени (справа–налево):

$$\dot{\lambda}_1 = -\frac{\partial H(T)}{\partial v_1} = -[c_{7u}(k_1 + 2k_5(v_1^* - v_1)) + k_6(v_2^* - v_2) + k_7(v_3^* - v_3) + k_8(v_4^* - v_4) + a_1\lambda_1],$$

$$T \in (N, 0), \quad \lambda_1(N) = 2g_{11}(v_1^*(N) - v_1(N));$$

$$\dot{\lambda}_2 = -\frac{\partial H}{\partial \lambda_2} = -[c_{7u}(k_2 + 2k_6(v_1^* - v_1)) + k_9(v_2^* - v_2) + k_{10}(v_3^* - v_3) + k_{11}(v_4^* - v_4) + a_{22}\lambda_2],$$

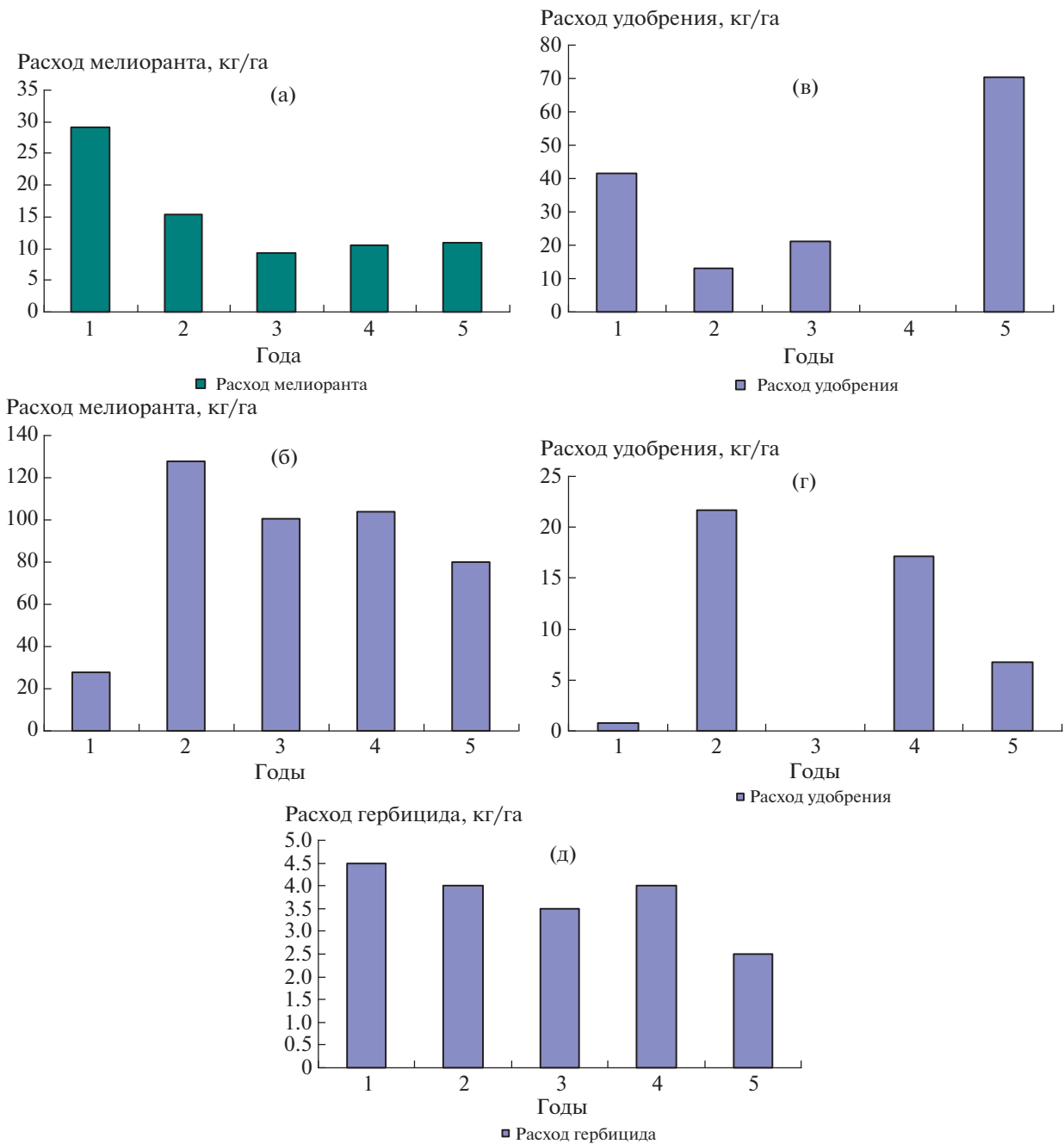


Рис. 3. Оптимальная стратегия внесения в годы севооборота: (а) – мелиоранта, (б) – фосфора, (в) – калия, (г) – магния, (д) – обработок гербицидами многолетних сорняков.

$$T \in (N, 0), \quad \lambda_2(N) = 2g_{11}(v_2^*(N) - v_2(N));$$

$$\dot{\lambda}_3 = -\frac{\partial H}{\partial v_3} = -[c_{Tu}(k_3 + k_7(v_1^* - v_1) + k_{10}(v_2^* - v_2) + 2k_{12}(v_3^* - v_3) + k_{13}(v_4^* - v_4) + a_{33}\lambda_2],$$

$$T \in (N, 0), \quad \lambda_3(N) = 2g_{33}(v_3^*(N) - v_3(N));$$

$$\dot{\lambda}_4 = -\frac{\partial H}{\partial v_4} = -[c_{Tu}(k_4 + k_8(v_1^* - v_1) + k_{11}(v_2^* - v_2) + 2k_{13}(v_3^* - v_3) + 2k_{14}(v_4^* - v_4) + a_{33}\lambda_4],$$

$$T \in (N, 0), \quad \lambda_4(N) = 2g_{44}(v_4^*(N) - v_4(N));$$

$$\dot{\lambda}_5 = -\frac{\partial H}{\partial s} = -[a_{55}\lambda_5],$$

$$T \in (N, 0), \quad \lambda_5(N) = 2g_{55}(s^*(N) - s(N))$$

получаются решения в обратном времени $\lambda_{1i}(-T), \lambda_{2i}(-T), \lambda_{3i}(-T), \lambda_{4i}(-T), \lambda_{5i}(-T), T = N,$

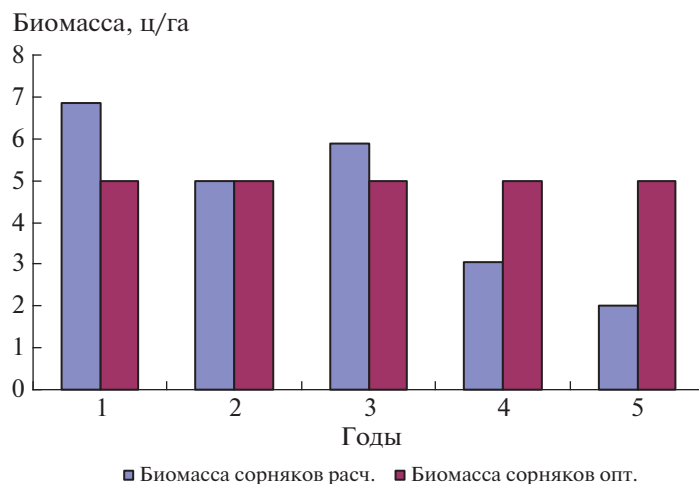


Рис. 4. Прогноз динамики накопления биомассы многолетних сорняков в годы севооборота.

$N - 1, \dots, 1$. Эти решения разворачиваются в прямом времени (T).

Шаг 3. Уточняются оптимальные стратегии:

$$d_{Ca,i+1}(T) = d_{Ca,i}(T) - \Delta_{1i}[c_{Ca} + b_{11}\lambda_{1i}(T)],$$

$$\text{если } d_{Ca}(T) < d_{Ca1}, \text{ то } d_{Ca}(T) = 0,$$

$$\text{если } d_{Ca,i}^*(T) > d_{Ca2}, \text{ то } d_{Ca,i}(T) = d_{Ca2};$$

$$d_{Pi+1}(T) = d_{Pi}(T) - \Delta_{2i}[c_P + b_{22}\lambda_{2i}(T)],$$

$$\text{если } d_{Pi}(T) < d_{1P}, \text{ то } d_{Pi}(T) = 0,$$

$$\text{если } d_{Pi}^*(T) > d_{P2}, \text{ то } d_{Pi}(T) = d_{P2};$$

$$d_{Ki+1}(T) = d_{Ki}(T) - \Delta_{3i}[c_K + b_{33}\lambda_{3i}(T)],$$

$$\text{если } d_{Ki}(T) < d_{1K}, \text{ то } d_{Ki}(T) = 0, \quad (12)$$

$$\text{если } d_{Ki}^*(T) > d_{K2}, \text{ то } d_{Ki}(T) = d_{K2};$$

$$d_{Mgi+1}(T) = d_{Mgi}(T) - \Delta_{4i}[c_{Mg} + b_{44}\lambda_{4i}(T)],$$

$$\text{если } d_{Mgi}(T) < d_{1Mg}, \text{ то } d_{Mgi}(T) = 0,$$

$$\text{если } d_{Mgi}^*(T) > d_{Mg2}, \text{ то } d_{Mgi}(T) = d_{Mg2};$$

$$g_{i+1}(T) = g_i(T) - \Delta_{5i}[c_g - b_g\lambda_{5i}(T)],$$

$$\text{если } g_i^*(T) < 0, \text{ то } g_i^*(T) = 0,$$

$$\text{если } g_i^*(T) > g_m, \text{ то } g_i^*(T) = g_m,$$

принимается циклическая переменная $i = i + 1$ и осуществляется переход к шагу 1, вплоть до выполнения условия $I_i \leq \delta$, где $\Delta_{1i} - \Delta_{5i}$ – оптимальные шаги алгоритма, являющиеся результатом дополнительной одномерной процедуры оптимизации; $d_{1,Ca}, d_{1,P}, d_{1,K}, d_{1,Mg}$ – нижние уровни ограничений на дозы внесения удобрений и мелиорантов, $d_{2,Ca}, d_{2,P}, d_{2,K}, d_{2,Mg}$ – верхние уровни ограничений на дозы внесения удобрений и мелиорантов; g_m – ограничение на дозы обработок гербицидами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Отправным пунктом решения задачи и гарантией точности и надежности решения задачи является качество используемых математических моделей. При этом, если оценка параметров моделей потенциального урожая культур (1) и потерь урожая (2) осуществляется вне реального времени, по результатам многих экспериментальных данных, полученных за предшествующие периоды исследования, то идентификация системы динамических моделей (5) осуществляется повторно, после каждого сельскохозяйственного года. На рис. 2 представлены результаты идентификации моделей динамики показателей химического состояния почвы в годы севооборота. Они получены по результатам многолетних наблюдений на биополигоне Меньковского филиала Агрофизического института. Ошибки моделирования во всех представленных моделях укладываются в допуск $\pm 5\%$, что вполне допустимо для решения задач управления. Следует отметить, что параметры этих моделей уточняются по результатам очередного сельскохозяйственного сезона, после ввода новых данных о реальных параметрах состояния почвы и сорных растений. Этим самым осуществляется адаптация задачи к меняющимся условиям и стабилизация ошибок моделирования.

На диаграммах (рис. 3) представлены оптимальные стратегии внесения удобрений, мелиорантов и обработок гербицидами в годы севооборота. Они найдены путем минимизации критерия оптимальности (10) и по своей сути представляют компромиссное решение между процессами стимуляции роста и развития растений за счет удобрений и мелиорантов и процессами подавления

роста и развития за счет влияния гербицидов. Это иллюстрируется диаграммой (рис. 4), на которой представлен процесс подавления сорной растительности в годы севооборота, где в 4-м и 5-м годах севооборота биомасса сорняков могла быть даже меньше требуемого уровня.

Для читателей, впервые сталкивающихся с рассматриваемой проблемой, невольно возникает вопрос: какая польза от полученного результата и где он может быть использован? Возвращаясь к общей концепции управления агротехнологиями, следует отметить, что полученные стратегии являются как основным инструментом планирования технологий, так и средством формирования ограничений на параметры технологий, реализуемых в течение вегетационных периодов для каждой из культур севооборота. Это позволяет избежать потерь урожая при смене культур с противоречивыми требованиями к содержанию элементов питания, а также чрезмерного подавления роста и развития культур в отсутствие обоснования доз обработок гербицидами.

В представленной работе отображены первые шаги в решении задачи управления состоянием агроценозов. В этом случае для простоты обработки методики решения использованы самые простые математические модели и подходы. В дальнейшем может быть расширено число рассматриваемых многолетних сорняков, учтено влияние однолетних сорных растений, рассмотрены другие севообороты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, впервые в современной аграрной науке поставлена и решена задача стратегического управления состоянием агроценоза, в составе которого содержится основная культура на примере яровой пшеницы и многолетние сорные растения. Результатом решения задачи является стратегия внесения минеральных удобрений, мелиорантов и обработок гербицидами в годы севооборота. Стратегия является результатом минимизации критерия оптимальности, учитывающего потери урожая и расхода затрачиваемых агрохимикатов. Рассматриваемый уровень управления является основным инструментом планирования агротехнологий и нормирования технологических операций, реализуемых в отдельные годы севооборота. Пример решения задачи показал работоспособность предложенной методики решения, а также обоснованность использованного программно-алгоритмического обеспечения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайленко И.М. Теоретические основы и техническая реализация управления агротехнологиями. СПб.: СПбГТУ, 2017. 250 с.
2. Немченко В.В., Рыбина Л.Д., Гилев С.Д., Кунгурцева Н.М., Степных Н.В., Копылов А.Н., Копылова С.В. Современные средства защиты растений и технологии их применения. Куртамыш: ГУП "Куртамышская типография". 2006. 348 с.
3. Михайленко И.М., Тимошин В.Н. Оптимизация управления химическими параметрами почв в полевых севооборотах // Агрохимия. 2016. № 3. С. 3–10.
4. Казаков И.Е. Методы оптимизации стохастических систем. М.: Наука, 1987. 3034 с.

Strategic Level of Agrocenosis State Management

I. M. Mikhailenko^{a,#} and V. N. Timoshin^a

^a Agrophysical Research Institute, Grazhdansky prosp. 14, Sankt-Petersburg 195220, Russia

[#] E-mail: Ilya.mihailenko@yandex.ru

The theoretical foundations of solving the problem of managing the state of agrocenoses, which include crops of the main crop and weeds, have been developed. The solution of this problem is aimed at eliminating the limitations of the existing paradigm of separate management of the state of crops and weeds. The application of mineral fertilizers simultaneously stimulates the growth and development of cultivated and weed plants, and herbicide treatments simultaneously inhibit the growth of both crops and weeds. As a result, this leads to significant crop losses and overspending of fertilizers and herbicides. The proposed theory and methodology is based on taking into account the relationship between the state of crops and weeds, and their overall effect on the content of nutrients in the soil. For this purpose, a system of mathematical models is proposed, which takes into account these relationships and crop losses when the parameters of the chemical state of the soil deviate from the optimal indicators for crop rotation crops and from the influence of herbicide treatments on crops. The result of solving the problem is optimal strategies for applying mineral fertilizers, meliorants and herbicides in the years of crop rotation. These strategies ensure minimization of crop losses of all crop rotation crops and consumption of agrochemicals. They are the main tool for planning agricultural technologies and rationing technological operations implemented in certain years of crop rotation. The results obtained are new, because currently there is no such toolkit.

Key words: agrocenosis, culture, weeds, fertilizers, herbicides, strategic management.