

## ПРОГРАММНЫЙ УРОВЕНЬ ОБЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ АГРОЦЕНОЗОМ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ СОРНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА СОСТОЯНИЕ ПОСЕВА КУЛЬТУРЫ

И.М. МИХАЙЛЕНКО<sup>✉</sup>, В.Н. ТИМОШИН

В современном растениеводстве сложилась традиционная парадигма раздельного управления состоянием посевов и сорных растений в составе одного агроценоза. Однако внесение минеральных удобрений одновременно стимулирует рост и развитие культур и сорной растительности, а обработки гербицидами подавляют рост как культурных, так и сорных растений. В результате это приводит к существенным потерям урожая и перерасходу удобрений и гербицидов. Цель настоящего исследования — разработка теоретической базы для решения задачи управления состоянием агроценозов, в составе которых присутствуют посевы основной культуры и сорные растения. Решение такой задачи направлено на устранения ограниченности существующей парадигмы раздельного управления состоянием посевов культур и сорной растительности. Ранее нами была разработана теория управления агротехнологиями, в которых объектом управления служит сельскохозяйственная культура без учета влияния сорной растительности в составе агроценоза. В соответствии с этой теорией управление состоянием посевов культур осуществляется на трех уровнях — стратегическом, программном и в реальном времени. В представленной работе впервые ставится и решается задача управления агроценозом на программном уровне, реализуемом на одном периоде вегетации. Суть этого вида управления заключается в формировании программ, представляющих собой последовательности технологических операций по внесению минеральных удобрений, поливов и обработок гербицидами, обеспечивающих получение заданной урожайности культуры при минимальных расходах затрачиваемых ресурсов. Для решения этой задачи в ранее разработанной теории видоизменены математические модели состояния посевов возделываемой культуры, в которых отражено влияние гербицидов. Кроме того, в состав задачи управления была введена модель параметров состояния доминирующих видов сорных растений, в которых, кроме доз обработок гербицидами, отражено влияние доз обработок минеральными удобрениями. Существенной доработке подверглась и математическая модель состояния почвенной среды, в которой учитывается влияние параметров состояния возделываемой культуры и сорных растений. Задача решается на примере посева яровой пшеницы в составе агроценоза. Наличие у яровой пшеницы нескольких фенологических фаз развития приводит к необходимости трансформирования структуры и параметров используемых математических моделей по всем фенофазам. Это привело к необходимости решать задачу формирования оптимальных программ управления агроценозом отдельно по каждому межфазовому периоду и объединять полученные частные программы в единую программу. В качестве метода решения задачи используется принцип максимума Понтрягина в сочетании со схемой динамического программирования (от конца вегетационного периода к его началу). При этом структурная сложность объекта управления, которым является сельскохозяйственное поле с агроценозом, приводит к необходимости решать задачу программного управления в три этапа. На первом этапе формируется программа изменения параметров почвенной среды, обеспечивающая достижение требуемой урожайности культуры. На этом этапе влияние обработок гербицидами на состояние посева культуры не учитывается. На втором этапе находится последовательность технологических операций, обеспечивающая наилучшее приближение параметров почвы к оптимальной программе, полученной на первом этапе. Наконец, на третьем этапе находят оптимальную последовательность обработок гербицидами, выполняемых одновременно с другими технологическими операциями. Для учета влияния этих обработок программы, полученные на первых двух этапах, уточняются до получения сходимости решения всей задачи.

**Ключевые слова:** программное управление, агроценоз, минеральные удобрения, гербициды, математические модели, алгоритмы управления.

В современном растениеводстве давно сложилась традиционная парадигма раздельного управления состоянием посевов и сорных растений в составе одного агроценоза. Развитие точного земледелия (ТЗ) послужило стимулом для создания эффективной теории управления агротехнологиями. Но в большей степени это отразилось в задачах управления состоянием посевов сельскохозяйственных культур. Здесь уже разработаны многие поло-

жения современной теории, начиная с создания общей концепции управления и заканчивая алгоритмами управления на различных временных уровнях (1, 2). Согласно этой теории, становится возможным формировать программы управления, представляющие собой последовательности технологических операций с оптимальным уровнем доз вносимых удобрений и норм поливов. Что касается управления состоянием сорной растительности, то здесь успехи в разработке теории более скромны, и на сегодняшний день оптимальные дозы обработок посевов гербицидами еще научно не обоснованы. При этом существующая теоретическая база управления состоянием сельскохозяйственных культур не учитывает того, что в составе агроценоза присутствует сорная растительность, и внесение удобрений и поливы стимулируют ее рост и развитие наряду с возделываемой культурой. Одновременно обработки агроценоза гербицидами подавляют рост не только сорной растительности, но и основной культуры. В итоге такое раздельное управление приводит к существенным потерям урожая, перерасходу удобрений и гербицидов и ухудшению экологических показателей окружающей среды. Появление в последнее время достаточного числа публикаций по совместному внесению удобрений и гербицидов показывает, что технологическая наука стремится к устранению недостатков существующей парадигмы раздельного управления (3-5). Это ставит новые задачи перед наукой об управлении агротехнологиями, заставляя ее рассматривать поле с агроценозом, как единый объект управления (ОУ).

Согласно предложенной концепции управления агротехнологиями в ТЗ, общая задача управления включает в себя четыре уровня задач, решаемых в разные масштабы времени (1). На верхнем 1-м уровне решается задача управления севооборотами в годовом масштабе; на 2-м уровне, реализуемом в суточном масштабе на одном интервале вегетации, решается задача программного управления. Первые два уровня являются планируемыми и решаются предварительно, вне реального времени. Задачи 3-го и 4-го уровней, где непосредственно формируются технологические операции, реализуются в реальном времени. Из всех приведенных уровней программный уровень управления является ключевым, так как именно через него осуществляется связь стратегических задач управления с задачами реального времени. На программном уровне управления планируется оптимальная последовательность технологических операций, обеспечивающая достижение требуемого результата (2).

В соответствии с предложенной концепцией управления на программном уровне в качестве ОУ принимается поле с посевом сельскохозяйственной культуры. Однако в концепции не учитывается тот факт, что на этом же поле в составе агроценоза, кроме основной культуры, произрастают однолетние и многолетние сорные растения. Они конкурируют с растениями возделываемой культуры за влагу и элементы питания, а потери урожая от засоренности посевов могут превышать 50 %. Следовательно, оптимальные технологические программы операций на рассматриваемом интервале вегетации должны включать в себя не только операции по внесению удобрений и поливы, но и обработки гербицидами. При этом такие программы должны формироваться с учетом того, что минеральное питание стимулирует рост как культурных растений, так и сорняков, а гербициды не только подавляют рост и развитие сорняков, но действуют угнетающе и на куль-

турные растения.

Формирование единой согласованной по состоянию растений основной культуры и сорных растений программы одновременного внесения минеральных удобрений и обработок гербицидами позволит избежать потерь урожая и перерасходов минеральных удобрений и гербицидов. Кроме того, оптимизация доз удобрений, отвечающих биологическим потребностям культуры в питательных элементах, активизирует процессы обмена веществ, обеспечивает ускорение инактивации поступающего гербицида и повышает устойчивость к нему у защищаемого растения. При этом защищаемая культура вследствие более интенсивного накопления органической массы получает значительно меньшую дозу гербицида на единицу массы, то есть происходит ростовое уменьшение содержания гербицида в тканях, а меньшие количества препарата при оптимальном обмене веществ быстрее инактивируются. Оптимальные условия питания также повышают общую биологическую конкурентоспособность культуры по отношению к сорнякам (3-5).

Анализ зарубежных публикаций в области управления агротехнологиями показал, что на сегодня разработаны только частные аспекты и мало связанные между собой задачи управления состоянием посевов культур: модели оценивания и предсказания биомассы посевов (7, 9), принципы зонального управления азотным питанием и рисками (10-12, 18), общие принципы управления ресурсами сельскохозяйственного производства, включая ресурсные модели (13-17, 19). На основании такого анализа можно утверждать, что до настоящего времени еще не разработана единая теоретическая база управления агротехнологиями в ТЗ.

Это обусловлено недостаточной изученностью агроценоза как единого объекта управления, для которого еще не созданы комплексные модели взаимосвязи состояния культур и сорных растений в посевах. В большой обзорной работе (20) обсуждается природа и практика применения полного ряда имитационных моделей по экологии, биологии и борьбе с сорными растениями, а также использование таких моделей для получения информации и поддержки принятия решений. Как правило, специалисты по защите растений исходят из количественной оценки плотности популяции и агрессивности сорняков. Важное место занимают модели, прогнозирующие потери урожая и устанавливающие пороговые значения для определения методов и сроков мероприятий по борьбе с сорной растительностью (21, 22). Были реализованы несколько подходов, основанных на связи между плотностью сорняков в посевах и потерей урожая, и доказано, что эта зависимость описывается прямоугольной гиперболой (23).

Биомасса сорняков может быть надежным предиктором потери урожая (24, 25): чем она выше (независимо от плотности сорняков в агроценозе), тем больше снижается урожайность культуры. Однако учет биомассы сорных растений требует много времени, и этот показатель трудно контролировать в полевых условиях. Еще одна проблема при прогнозировании потерь урожая по биомассе сорняков заключается в том, что нет четкого понимания, какую часть этой биомассы следует рассматривать. Пример по прогнозированию воздействия сорняков и потерь урожая — предложенная М.Ж. Кгор и Ж.Т. Spitters (26) модель для сахарной свеклы.

Адаптивные изменения сорняков — возможно, еще один фактор, который требуется учитывать при анализе системы сорняки—сельскохозяй-

ственные культуры. При повышении конкурентоспособности сорных растений снизится потенциал сельскохозяйственных культур. Как следствие, точность прогнозных моделей потери урожая из-за сорняков постепенно будет снижаться (27, 28). Поэтому для корректного учета взаимного влияния сорняков и сельскохозяйственных культур необходима периодическая параметризация и повторная калибровка моделей.

На практике решение проблемы потерь урожая от сорняков требует знаний о видоспецифичных, изменяющихся во времени отношениях между сорными и культурными видами растений, понимания краткосрочных и долгосрочных последствий принятой тактики защитных мероприятий (29, 30). Без подобным образом интерпретируемой информации о многофакторных событиях нельзя разработать программы защитных мероприятий, которые будут эффективны, функциональны и не повредят нецелевым организмам (31-34).

Особенно велика потребность в средствах поддержки принятия решений (СППР) для специалистов-практиков. В таких СППР должны сочетаться модели динамики популяции сорняков, экономической эффективности технологии (35-37) и ее воздействия на окружающую среду (36, 37). Такие СППР позволят практикам моделировать новые варианты управления в местных условиях, адаптировать концепции устойчивого управления с учетом особенностей резидентных сорняков (38-40) и сравнивать вероятные краткосрочные результаты возможных вмешательств. Некоторые СППР моделируют краткосрочные результаты тактики механического контроля (31, 41-43). Наиболее эффективны тактики СППР для решений по химической борьбе с сорными растениями (36, 37, 42, 44, 45). Эти СППР предоставляют руководство для выбора по ряду аспектов применения гербицидов (31, 38, 46-49). Кроме того, многие программные решения предлагают прогнозы финансовых последствий возможных мероприятий (31, 42, 46-49).

Инструменты поддержки принятия решений для превентивного управления выполняют две основные задачи: во-первых, они предсказывают засоренность посевов и прибыли при разных вариантах вмешательств в течение несколько лет; во-вторых, они предоставляют эти прогнозы в рамках соответствующей намеченной цели (40-44).

Проведенный анализ показывает, что при всей широте охвата проблемы в предлагаемых разработках не представлена такая постановка задачи управления агроценозом, которая включала бы как обоснованные математические модели, так и выбор достижимых целей управления, форм критериев оптимальности и эффективных алгоритмов управления, посредством которых формируются программы технологических операций, обеспечивающих достижение поставленных целей управления.

В предлагаемой работе нами впервые ставится и решается задача единого управления агроценозом на программном уровне, реализуемом на одном периоде вегетации. Для ее решения в ранее разработанной теории управления агротехнологиями видоизменены математические модели состояния посевов возделываемой культуры, в которых отражено влияние гербицидов. Кроме того, в состав задачи управления введена модель параметров состояния доминирующих видов сорных растений, в которых, кроме доз обработок гербицидами, отражено влияние доз обработок минеральными удоб-

рениями. При этом нами предложена новая трехэтапная процедура программного управления агроценозом. На первом этапе формируется программа изменения параметров почвенной среды, обеспечивающая достижение требуемой урожайности культуры. На этом этапе влияние обработок гербицидами на состояние посева культуры не учитывается. На втором этапе находится последовательность технологических операций, обеспечивающая наилучшее приближение параметров почвы к оптимальной программе, полученной на первом этапе. Наконец, на третьем этапе находят оптимальную последовательность обработок гербицидами, выполняемых одновременно с другими технологическими операциями.

Цель настоящей работы заключалась в дальнейшем развитии теории программного управления агротехнологией за счет перехода к объекту управления, которым служит поле с агроценозом, где основной культурой является яровая пшеница.

*Методика.* Для решения задачи применяется классическая теория управления с использованием методов динамического программирования и принципа максимума Понтрягина (6). Согласно этой теории, исходный пункт решения любой задачи программного управления — выбор достижимой цели. Когда мы имеем дело с агротехнологией, то такой целью может быть только получение заданного урожая культуры в конце вегетационного периода. Любая задача управления базируется на математическом описании ОУ. В рассматриваемом случае это сельскохозяйственное поле с агроценозом, в составе которого присутствует посев яровой пшеницы. Фундаментальной основой для решения задач программного управления служат математические модели, описывающие динамику параметров состояния объекта управления (ОУ). При этом кроме математической модели основной культуры, ОУ должен дополняться моделью сорных растений. Такие модели должны отражать влияние внешних неуправляемых возмущений, влияние управляемых воздействий на параметры состояния ОУ и учитывать их взаимосвязь между собой через почвенную среду.

Для достижения вышеуказанной цели управления прежде всего необходимо выбрать наиболее важные целеобразующие параметры состояния посева возделываемой культуры. При этом рассматриваемая культура характеризуется как континуальными параметрами состояния, к которым могут быть отнесены параметры состояния биомассы самого посева и почвенной среды, так и структурными состояниями, к которым относятся фенологические фазы развития (фенофазы). Для яровой пшеницы в зависимости от длительности интервала в суточном масштабе времени  $t$  таковыми состояниями являются: при  $t \in (0-7)$   $s = 1$ , фаза посев; при  $t \in (11-13)$   $s = 2$ , фаза всходы (1-й, 2-й, 3-й листы); при  $t \in (21-29)$   $s = 3$ , фаза кушение; при  $t = 30$   $s = 4$ , фаза выход в трубку; при  $t \in (31-32)$   $s = 5$ , фаза междоузлие; при  $t = 37$   $s = 6$ , фаза флаговый лист; при  $t = 39$   $s = 7$ , фаза язычок; при  $t = 49$   $s = 8$ , фаза открытие листовой пазухи; при  $t \in (51-59)$   $s = 9$ , фаза колошение; при  $t \in (61-69)$   $s = 10$ , фаза цветение; при  $t \in (71-75)$   $s = 11$ , фаза молочная спелость; при  $t \in (85-86)$   $s = 12$ , фаза восковая спелость; при  $t \geq 86$   $s = 13$ , фаза полная спелость.

Весь период вегетации в зависимости от структуры биомассы посева может быть разделен на два интервала времени: со 2-й по 9-ю и с 9-й по 13-ю фенофазы. В то же время внесение удобрений, обработки гербицидами

и поливы проводятся в фиксированные моменты времени наступления заранее выбранных следующих фенологических фаз:  $s = 3$  (кушение),  $s = 9$  (колошение),  $s = 10$  (цветение),  $s = 11$  (молочная спелость). Это заставляет прибегать к разбивке всего интервала управления на четыре интервала между выбранными фенофазами: 1-й — от кушения до колошения ( $T_3, T_9$ ), 2-й — от колошения до цветения ( $T_9, T_{10}$ ), 3-й — от цветения до молочной спелости ( $T_{10}, T_{11}$ ), 4-й — от молочной спелости до полной спелости ( $T_{11}, T_{13}$ ).

Для первого интервала времени для фенофаз с 3-й по 9-ю модель динамики параметров структуры биомассы посева имеет следующий вид (1, 2):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_{1m} \\ \dot{x}_{2m} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} x(t)_{1m} \\ x(t)_{2m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} v_N(t) \\ v_K(t) \\ v_P(t) \\ v_{Mg}(t) \\ v_5(t) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} g_1(t) \\ g_2(t) \end{bmatrix}_m, t \in (T_3, T_9), \end{aligned} \quad [1]$$

где приняты следующие обозначения:  $x_{1m}$  — средняя по площади поля плотность биомассы посева (урожайность),  $ц \cdot га^{-1}$ ;  $x_{2m}$  — средняя по площади поля плотность сырой массы посева,  $ц \cdot га^{-1}$ ; внешними возмущениями в обоих блоках являются  $f_1$  — среднесуточная температура воздушной среды,  $°C$ ;  $f_2$  — среднесуточный уровень радиации,  $Вт \cdot (м^2 \cdot ч)^{-1}$ ;  $f_3$  — среднесуточная интенсивность осадков, мм; параметры химического состояния почвы:  $v_N$  — содержание азота в почве,  $кг \cdot га^{-1}$ ;  $v_K$  — содержание калия в почве,  $кг \cdot га^{-1}$ ;  $v_P$  — содержание фосфора в почве,  $кг \cdot га^{-1}$ ;  $v_{Mg}$  — содержание магния в почве,  $кг \cdot га^{-1}$ ;  $v_5$  — влагозапас в почве, мм;  $g_{1m}(t), g_{2m}(t)$  — дозы обработки гербицидами,  $г \cdot га^{-1}$ . В связи с научно-методическим значением настоящей работы мы не раскрываем здесь виды гербицидов, так как развиваемый нами подход реализуем для любых гербицидов.

Модель [1] для дальнейшего использования удобно представить в канонической символьной векторно-матричной форме, где все переменные объединены в векторы, а параметры — в соответствующие матрицы:

$$\dot{X}_m = A_m X_m(t) + B_m V(t) + C_m F(t) - D_m G_m(t). \quad [2]$$

Для интервалов со второго — ( $T_9, T_{10}$ ), ( $T_{10}, T_{11}$ ) и ( $T_{11}, T_{13}$ ) — модели динамики параметров структуры биомассы посева имеют общий вид и различаются только значениями параметров (1, 2):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_{1u} \\ \dot{x}_{2u} \\ \dot{x}_{3u} \end{bmatrix}_j &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} x(t)_{1u} \\ x(t)_{2u} \\ x(t)_{3u} \end{bmatrix}_j + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} v_N(t) \\ v_K(t) \\ v_P(t) \\ v_{Mg}(t) \\ v_5(t) \end{bmatrix}_j + \\ &+ \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix}_j - \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \\ d_{31} & d_{32} \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} g_1(t) \\ g_2(t) \end{bmatrix}_j, \\ &j = 1, t \in (T_9, T_{10}); j = 2, t \in (T_{10}, T_{11}), j = 3, t \in (T_{11}, T_{13}). \end{aligned} \quad [3]$$

В этой модели параметрами состояния являются  $x_{1u}$  — средняя по площади поля плотность биомассы посева,  $ц \cdot га^{-1}$ ;  $x_{2u}$  — средняя по площади поля плотность сырой массы посева,  $ц \cdot га^{-1}$ ;  $x_{3u}$  — средняя по площади поля плотность массы колосьев (урожая),  $ц \cdot га^{-1}$ ; внешними возмущениями в обоих блоках являются  $f_1$  — среднесуточная температура воздушной среды,  $^{\circ}C$ ;  $f_2$  — среднесуточный уровень радиации,  $Вт \cdot (м^2 \cdot ч)^{-1}$ ;  $f_3$  — среднесуточная интенсивность осадков, мм; параметры химического состояния почвы:  $v_N$  — содержание азота в почве,  $кг \cdot га^{-1}$ ;  $v_K$  — содержание калия в почве,  $кг \cdot га^{-1}$ ;  $v_P$  — содержание фосфора в почве,  $кг \cdot га^{-1}$ ;  $v_{Mg}$  — содержание магния в почве,  $кг \cdot га^{-1}$ ;  $v_5$  — влагозапас в почве, мм;  $g_{1u}(t)$ ,  $g_{2u}(t)$  — дозы обработки гербицидами,  $г \cdot га^{-1}$ ;  $j = 1, 2, 3$  — номера интервалов управления после фазы колошение.

Каноническая символьная векторно-матричная форма модели имеет следующий вид (3):

$$\dot{X}_{uj} = A_{uj} X_{uj}(t) + B_{uj} V_{uj}(t) + C_{uj} F(t) - D_{uj} G_{uj}(t). \quad [4]$$

Как было указано выше, кроме модели [4], для решения задачи необходима динамическая модель биомассы доминирующих видов сорняков, векторно-матричная форма которой имеет вид

$$\dot{S}_j = A_{sj} S_j(T) + B_{sj} V_j(T) - B_{gj} G_j(t) + C_{sj} F(t), \quad [5]$$

где  $S^T = [s_1 \ s_2]$  — вектор биомасс доминирующих видов сорняков,  $T$  — индекс транспонирования вектора или матрицы,

$$A_s = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 \\ 0 & a_{22} \end{bmatrix}_s, B_s = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \end{bmatrix}_s, B_g = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \end{bmatrix}_g, C_s = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \end{bmatrix}_s —$$

матрицы параметров модели.

Модель [5] включает в себя состояния двух доминирующих видов сорняков. Для других условий их число и виды могут быть другими, что только уточняет структуру алгоритмов, но не меняет общий подход к решению задачи.

Модели [2], [4], [5] представляют основной блок параметров состояния ОУ. Кроме этого блока, ОУ содержит блок передачи управления, которым является почвенная среда (ПС). Именно через указанный блок осуществляется конкуренция растений культуры и сорной растительности за элементы питания и влагу.

Модель динамики параметров состояния почвы для фазофаз с 3-й по 9-ю приобретает следующий вид (1):

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_N \\ \dot{v}_K \\ \dot{v}_P \\ \dot{v}_{Mg} \\ \dot{v}_5 \end{bmatrix}_{3,9} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & a_{15} \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & a_{25} \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & a_{35} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} \end{bmatrix}_{3,9} \begin{bmatrix} v_N \\ v_K \\ v_P \\ v_{Mg} \\ v_5 \end{bmatrix}_{3,9} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{3,9} \begin{bmatrix} d_N(t) \\ d_K(t) \\ d_P(t) \\ d_{Mg}(t) \\ d_W(t) \end{bmatrix}_{3,9} +$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} \\ 0 & 0 & c_{23} \\ 0 & 0 & c_{33} \\ 0 & 0 & c_{43} \\ c_{51} & c_{52} & 1 \end{bmatrix}_{3,9} \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_{11} & 0 \\ m_{21} & 0 \\ m_{31} & 0 \\ m_{41} & 0 \\ m_{51} & m_{52} \end{bmatrix}_{3,9} \begin{bmatrix} x_{1m}(t) \\ x_{2m}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \\ p_{31} & p_{32} \\ p_{41} & p_{42} \\ p_{51} & p_{52} \end{bmatrix}_{3,9} S(t), \quad [6]$$

или в компактной символьной форме

$$\dot{V}_{3,9} = A_{3,9} V(t) + B_{3,9} D(T_3, T_9) + C_{3,9} F(t) - M_{3,9} X_m(t) - P_{3,9} S(t). \quad [7]$$

Модели динамики параметров состояния почвы для интервалов ( $T_9$ ,  $T_{10}$ ), ( $T_{10}$ ,  $T_{11}$ ) и ( $T_{11}$ ,  $T_{13}$ ) имеют один и тот же вид, различаясь только значениями параметров:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{v}_N \\ \dot{v}_K \\ \dot{v}_P \\ \dot{v}_{Mg} \\ \dot{v}_5 \end{bmatrix}_j &= \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & a_{15} \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & a_{25} \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & a_{35} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} v_N \\ v_K \\ v_P \\ v_{Mg} \\ v_5 \end{bmatrix}_j + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} d_N(t) \\ d_K(t) \\ d_P(t) \\ d_{Mg}(t) \\ d_W(t) \end{bmatrix}_j + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} \\ 0 & 0 & c_{23} \\ 0 & 0 & c_{33} \\ 0 & 0 & c_{43} \\ c_{51} & c_{52} & 1 \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix}_j - \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & m_{13} \\ m_{21} & 0 & m_{23} \\ m_{31} & 0 & m_{33} \\ m_{41} & 0 & m_{43} \\ m_{51} & m_{52} & 0 \end{bmatrix}_j \begin{bmatrix} x_{1u}(t) \\ x_{2u}(t) \\ x_{3u}(t) \end{bmatrix}_j - \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \\ p_{31} & p_{32} \\ p_{41} & p_{42} \\ p_{51} & p_{52} \end{bmatrix}_j S(t), \end{aligned} \quad [8]$$

где  $dp(t)$ ,  $dk(t)$ ,  $dn(t)$ ,  $dw(t)$  — дозы внесения элементов питания (соответственно фосфора P, калия K, мелиоранта Ca, азота N и магния Mg,  $\text{кг} \cdot \text{га}^{-1}$ ) и норма полива, мм;  $a_{11}-a_{33}$ ,  $b_2-b_3$ ,  $c_1-c_3$  — параметры модели, оцениваемые по экспериментальным данным;  $t$  — время, сут.

Модель [8] в компактной символьной векторно-матричной форме

$$\dot{V}_j = A_j V_j(t) + B_j D_j(t) + C_j F(t) - M_j X_j(t) - P_j S(t). \quad [9]$$

Сложная многомерная структура ОУ, включающая модели [2], [4], [5] основного блока параметров состояния и блоки передачи управления [7], [9], приводит к необходимости решать задачу программного управления в два этапа (1, 2). На первом этапе находится программа потенциального развития посева культуры на всем интервале вегетации, обеспечивающая достижение поставленной цели управления. В этом случае не учитывается влияние сорной растительности, а в качестве управляющих переменных рассматриваются параметры состояния ПС без учета технологических ограничений. Полученная таким образом управляющая программа служит ориентиром для формирования последовательности технологических операций, включающих внесение удобрений, поливы и обработки гербицидами.

Поэтому на втором этапе находится последовательность технологических операций, которая должна обеспечивать минимальное отклонение параметров ПС от оптимальной программы, полученной на первом этапе. Такая декомпозиция задачи программного управления существенно упрощает синтез оптимальных программ управления. Кроме того, полученные на первом этапе результаты оптимизации как характеристика потенциального уровня урожайности культуры представляют самостоятельный интерес.

В соответствии со схемой динамического программирования (6) задача первого этапа решается от конца вегетационного периода к его началу. Целью управления при этом служит получение заданной урожайности культуры в конце интервала вегетации при выполнении следующих условий: достижение требуемой структуры всего биологического урожая (а именно требуемого количественного соотношения между зерном и соломой), требуемой влажности зерна, а также снижение биомассы сорных растений в агроценозе до заданного уровня.

В обозначенных параметрах состояния цель управления для указанного интервала вегетации формально выглядит следующим образом:



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

где  $U^*(T_{13})$  — заданная урожайность, ц · га<sup>-1</sup>;  $S_{uj}^*$  — заданная биомасса сорных растений.

Критерий оптимальности для межвегетационного периода с 9-й по 13-ю фенофазу, отвечающий поставленной цели, имеет следующий вид:

$$J_{uj}(T_{13}) = [X_{uj}(T_{13}) - X_{uj}^*(T_{13})]^T G_u [X_{uj}(T_{13}) - X_{uj}^*(T_{13})] + [S_{uj}(T_{13}) - S_{uj}^*(T_{13})]^T Q [S_{uj}(T_{13}) - S_{uj}^*(T_{13})], \quad [10]$$

где  $X^{*T} = [2,1U^* \ 0,15U^* \ U^*]$  — вектор, компонентами которого служат общая биомасса, сырая масса, масса зерна (урожай);

$$G_u = \begin{pmatrix} g_{11} & 0 & 0 \\ 0 & g_{22} & 0 \\ 0 & 0 & g_{33} \end{pmatrix} \text{ — весовая матрица массовых и качественных составляющих критерия,}$$

$$Q = \begin{pmatrix} q_1 & 0 \\ 0 & q_2 \end{pmatrix} \text{ — весовая матрица компонентов биомассы сорных растений,}$$

$j = 0, 1, 2, 3$  — индексы интервалов управления.

Для формирования оптимальных программ на всех интервалах управления используется принцип максимума Понтрягина (6). В соответствии с этим методом гамильтониан системы, включающей в себя модели [4], [5] и критерий [10], имеет следующий вид:

$$H_{uj}(t) = \Psi_{1,uj}^T [A_{uj} X_{uj}(t) + B_{uj} V_{uj}(t) + C_{uj} F(t) - D_{uj} G_{uj}(t)] + \Psi_{2,uj}^T [A_s S_{uj}(T) + B_s V_{uj}(T) - B_g G_j(t) + C_s F(T)]. \quad [11]$$

а модели сопряженных переменных — соответственно

$$\dot{\Psi}_{1,uj=3,i} = -\frac{\partial H_{uj=3,i}}{\partial X_{1,uj=3,i}} = -A_{uj=3,i}^T \Psi_{1,uj=3,i}, \quad t \in (T_{11}, T_{13}), \quad \Psi_{1,uj=3,i}(T_{13}) = [X_{uj}(T_{13}) - X_{uj}^*], \quad [12]$$

$$\dot{\Psi}_{2,uj=3,i} = -\frac{\partial H_{uj=3,i}}{\partial S_{1,uj=3,i}} = -A_{sj=3,i}^T \Psi_{2,uj=3,i}, \quad t \in (T_{11}, T_{13}), \quad \Psi_{2,uj=3,i}(T_{13}) = 2[S_{uj}(T_{13}) - S_{uj}^*]. \quad [13]$$

Алгоритм формирования оптимальной программы изменения параметров почвенной среды, обеспечивающей достижение цели управления, включает в себя следующие итерационные процедуры:

1) формирование оптимальных программ изменения параметров ПС:

$$V_{uj,i+1}^*(t) = V_{uj,i}^*(t) - \Delta_i GR_{uj,i}(t), \\ GR_{uj,i}(t) = \frac{\partial H}{\partial V_{uj,i}}(t) = B_{uj}^T \Psi_{1,uj,i}(t) + B_s^T \Psi_{2,uj,i}(t). \quad [14]$$

2) поиск начальных условий на границах фенофаз:

$$X_{uj,i+1}^*(T_{11}) = X_{uj,i}^*(T_{11}) - \Delta_i \Psi_{1,uj,i}(T_{11}), \quad [15]$$

$$S_{uj,i+1}^*(T_{11}) = S_{uj,i}^*(T_{11}) - \Delta_i \Psi_{2,uj,i}(T_{11}). \quad [16]$$

В результате решения задачи первого этапа формируется оптимальная программа изменения вектора параметров ПС  $V^*(t)$ , состоящая из отдельных кусков на четырех интервалах управления между выбранными фенофазами. Этой программе соответствуют программа изменения вектора параметров состояния посева  $X^*(t)$  и программа изменения вектора параметров биомассы сорняков  $S^*(t)$  на этих интервалах управления.

Достижимой целью управления на втором этапе общего решения задачи является обеспечение наиболее близкого приближения к оптимальным программам содержания элементов питания и влаги в почве, полученным на первом этапе прогнозных программ, полученных за счет независимого выбора доз подкормок и поливов. При этом внесение удобрений и поливы

проводятся в фиксированные моменты времени наступления следующих фенологических фаз:  $s = 3$  (кушение),  $s = 9$  (колошение),  $s = 10$  (цветение),  $s = 11$  (молочная спелость).

Как и для первого этапа, задача решается отдельно для каждого интервала управления, но уже в прямом направлении — от начала периода вегетации к его концу.

Частные критерии оптимальности для каждого  $j$ -го интервала управления имеют один и тот же вид:

$$J_j = \int_{T_{1j}}^{T_{2j}} [(V_j^*(t) - V_j(t))^T G_j (V_j^*(t) - V_j(t)) + C_D D_j(t)] dt, \quad j = 0, 1, 2, 3, \quad [17]$$

$$G_j = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_5 \end{bmatrix} \quad \text{— весовая матрица, } C_D \text{ — вектор цен на единицу доз.}$$

Критерий [17] формируется посредством модели параметров состояния почвы [9]:

$$\dot{V}_j = A_j V_j(t) + B_j D_j(t) + C_j F(t) - M_j X_j^*(t) - P_j S_j^*(t),$$

где  $X_j^*(t)$ ,  $S_j^*(t)$  — оптимальные программы параметров состояния посевов и сорняков, полученные на первом этапе.

Гамильтонианы для всех интервалов управления одинаковы:

$$H_j = [(V_j^*(t) - V_j(t))^T G_j (V_j^*(t) - V_j(t)) + C_D D_j(t)] + \Psi_j^T [A_j V_j(t) + B_j D_j(t) + C_j F(t) - M_j X_j^*(t) - P_j S_j^*(t)], \quad [18]$$

где  $\Psi_j^T$  — векторы сопряженных переменных на  $j$ -х интервалах управления.

Модели сопряженных переменных имеют следующий вид:

$$\dot{\Psi}_j(t) = -\frac{\partial H_j(t)}{\partial V_j} = -[2G_j (V_j^*(t) - V_j(t)) + \tilde{A}_j^T \Psi_j(t)], \quad t \in (T_{2j}, T_{1j}), \quad \Psi_j(T_{2j}) = 0 \quad [19]$$

Алгоритм формирования последовательностей доз внесения удобрений (оптимальных программ управления) включает в себя итерационную процедуру последовательного поиска очередных приближений векторов доз внесения удобрений и поливов:

$$D_{i+1}^*(T_{1j}) = D_i^*(T_{1j}) - \Delta_i^* \frac{\partial H_j(T_{1j})}{\partial D_i(T_{1j})}, \quad [20]$$

$$D_{i+1}^*(T_{1j}) = D_i^*(T_{1j}) - \Delta_i^* (C_D + \tilde{B}_j^T \Psi_{i,j}(T_{1j})), \quad \text{если } D_{i+1}^*(T_{1j}) \in \Omega_j;$$

$$D_{i+1}^*(T_{1j}) = D_i^*(T_{1j}), \quad \text{если } D_{i+1}^*(T_{1j}) \notin \Omega_{T_{1j}}.$$

В результате решения задачи на втором этапе формируются последовательности доз внесения удобрений и поливов по всем интервалам управления  $D_j^*(T_{1j})$ ,  $j = 0, 1, 2, 3$ , которым соответствуют программы изменения параметров почвенной среды  $V_j^*(t)$ , параметров состояния посева  $X_j^*(t)$  и параметров биомассы сорняков  $S_j^*(t)$ .

Найденная оптимальная последовательность технологических операций (программа) пока не учитывает прямое влияние гербицидов на состояние посева культуры в соответствии с моделями [2], [4]. В начале процедуры формирования программы управления такое влияние невозможно учесть, так как дозы обработок априорно не известны. Поэтому необходимо ввести еще один внешний оптимизационный цикл, в котором такое

влияние учитывается. Для этого необходимо замкнуть всю процедуру формирования оптимальной программы управления по дозам обработки гербицидами.

Для решения задачи используются модели [4], [5]

$$\dot{X}_{uj} = A_{uj} X_{uj}(t) + B_{uj} V_j^*(t) + C_{uj} F(t) - D_{uj} G_{uj}(t),$$

$$\dot{S}_j = A_s S_j(t) + B_s V_j^*(t) - B_g G_j(t) + C_s F(t),$$

где  $V_j^*(t)$  – оптимальная программа изменения параметров почвенной среды, полученная на втором этапе.

Целью управления на рассматриваемом этапе служит выбор таких доз обработок гербицидами на всех интервалах управления, которые обеспечивают наилучшее приближение прогнозных программ изменения параметров состояния посевов и параметров биомассы сорняков к оптимальным программам, найденным на втором этапе.

Этой цели соответствует следующие критерии оптимальности на отдельных интервалах управления:

$$J_j = \int_{T_{1j}}^{T_{2j}} [(X_j^*(t) - X_j(t))^T G_{1j} (X_j^*(t) - X_j(t)) + (S_j^*(t) - S_j(t))^T G_{2j} (S_j^*(t) - S_j(t))] dt, \quad [21]$$

$$j = 0, 1, 2, 3$$

Алгоритм формирования программ обработки гербицидами представляет собой следующую итерационную процедуру:

$$G_{j,i+1}^*(T_{1j}) = G_{j,i}^*(T_{1j}) - \Delta_i GR_{j,i}(T_{1j}),$$

$$GR_{j,i}(T_{1j}) = \frac{\partial H_{j,i}}{\partial G_{ji}}(T_{1j}) = D_j \Psi_{1j,i}(T_{1j}) + B_s \Psi_{2j,i}(T_{1j}). \quad [22]$$

На первом этапе формирование программ внесения удобрений проводилось без учета программ обработки гербицидами. С учетом того, что внесение удобрений и обработка гербицидами осуществляются одновременно, программы внесения удобрений требуют коррекции по программам обработок гербицидами. Для этого в алгоритм вводятся три глобальных шага.

Шаг 1. Принимается глобальная циклическая переменная  $k = 1$ . Программа обработок гербицидами  $G^*(T_{1j})$  по всем интервалам управления подставляется в интервальные модели, решая их от начала  $j = 0$  до конца  $j = 3$ :

$$\dot{X}_{uj} = A_{uj} X_{uj}(t) + B_{uj} V_j^*(t) + C_{uj} F(t) - D_{uj} G_{uj}(t), \quad t \in (T_{1j}, T_{2j}), \quad [23]$$

$$\dot{S}_j = A_s S_j(t) + B_s V_j^*(t) - B_g G_j(t) + C_s F(t), \quad t \in (T_{1j}, T_{2j}), \quad [24]$$

при этом конечные решения на текущем интервале принимаются в качестве начальных для последующих интервалов:  $X_0(T_{1j+1}) = X(T_{2j})$ ,  $S_0(T_{1j+1}) = S(T_{2j})$ . На начальном интервале принимаются общие для всей задачи начальные условия:  $X_0(T_{1j} = 0)$ ,  $S_0(T_{1j} = 0)$ . Для интервала управления принимается глобальная циклическая переменная  $k = 1$ ,  $j = 3$  вычисляется критерий в конце интервала вегетации:

$$J_{k=1}(T_{13}) = [X_{uj=3}(T_{13}) - X_{uj=3}^*(T_{13})]^T G_u [X_{uj=3}(T_{13}) - X_{uj=3}^*(T_{13})] + [S_{uj=3}(T_{13}) - S_{uj=3}^*(T_{13})]^T Q [S_{uj=3}(T_{13}) - S_{uj=3}^*(T_{13})]. \quad [25]$$

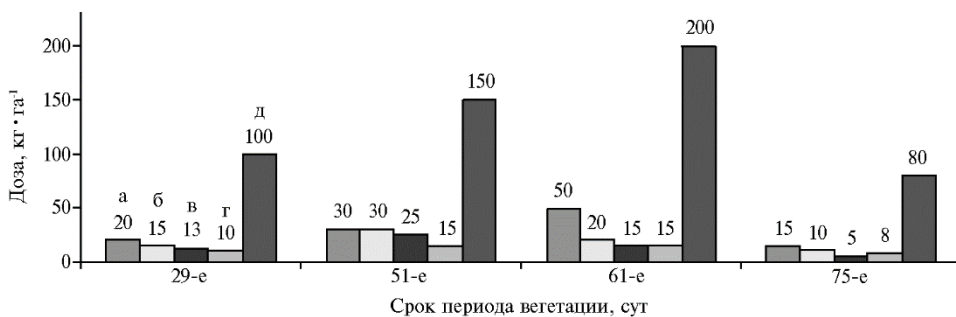
Шаг 2. Если критерий  $J_{k=1}(T_{13})$  меньше заданной величины  $\Delta$ , то СТОП, иначе решения моделей [4], [5] переносятся в пункт 1 первого этапа, и все этапы задачи повторяются вплоть до получения нового критерия  $J_{k=2}(T_{13})$ .

Шаг 3. Если критерий  $J_k = 2(T_{13})$  меньше критерия  $J_k = 1(T_{13})$ , то требуется перенос решений моделей [4], [5] в пункт 1 первого этапа, иначе СТОП, и принимаются решения для предшествующего критерия  $J_k = 1(T_{13})$ .

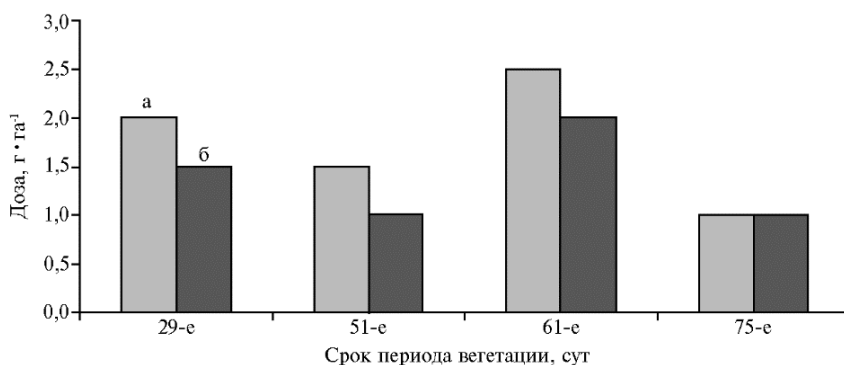
*Результаты.* Результат настоящей работы — предложенный алгоритм программного управления состоянием агроценоза с посевом яровой пшеницы. Этот алгоритм воплощает новую теорию управления агроценозом и реализован в новом специализированном программном продукте. Новизна и сложность алгоритма требует его апробации по экспериментальным данным, что должно отражать возможность использования полученных результатов в реальном производстве.

По своей сути апробация заключается в установлении факта устойчивости алгоритма управления и его сходимости к минимуму выбранного критерия оптимальности. Эти условия могут быть получены только при качественной идентификации всех используемых в задаче математических моделей. Она проводилась по экспериментальным данным, полученным за 2015-2021 годы в Меньковском филиале Агрофизического института (Ленинградская обл.).

На диаграммах (рис. 1, 2) приведены результаты оптимизации программ управления агроценозом, включающие в себя последовательности доз внесения минеральных удобрений, поливов и обработок гербицидами. Программа ориентирована на получение заданного урожая зерна 30 ц/га.



**Рис. 1.** Оптимальная программа единого управления агроценозом по дозам внесения минеральных удобрений и поливам: а, б, в, г — дозы внесения соответственно азота, калия, фосфора и магния; д — норма полива, т · га<sup>-1</sup>.



**Рис. 2.** Оптимальная программа единого управления агроценозом по дозам обработок гербицидами: а — доза внесения гербицида 1, б — доза внесения гербицида 2.

Здесь технологические операции проводились в моменты наступления фенофаз:  $t = 29$  сут (кушение),  $t = 51$  сут (колошение),  $t = 61$  сут (цветение),  $t = 75$  сут (молочная спелость).

Этим программам соответствует прогнозная динамика параметров

биомассы посева яровой пшеницы и двух доминирующих видов сорняков (рис. 3, 4).



Рис. 3. Динамика параметров биомассы посева яровой пшеницы при оптимальной программе единого управления агроценозом.



Рис. 4. Динамика параметров биомассы доминирующих видов сорняков при оптимальной программе единого управления агроценозом: 1 — сорняк 1, 2 — сорняк 2.

Приведенные оптимальные программы управления получены для 3-х итераций глобального цикла алгоритма, чему соответствовали следующие значения критерия оптимальности [10] для заключительной фазы посева: итерация 1 —  $J_{и} = 32$  (ц/га)<sup>2</sup>, итерация 2 —  $J_{и} = 14$  (ц/га)<sup>2</sup>, итерация 3 —  $J_{и} = 6$  (ц/га)<sup>2</sup>. Заметим, что все используемые критерии оптимальности являются квадратическими функциями, поэтому размерность их урожайности взята в квадрате. Убывание критерия оптимальности по итерациям глобального цикла алгоритма доказывает его устойчивость и последовательное приближение к минимуму критерия оптимальности.

Как видно из представленного графика (см. рис. 3), оптимальная программа по одновременному внесению удобрений, поливам и обработкам гербицидами обеспечивает плавный рост и развитие посева яровой пшеницы от всходов до заданного урожая 30 ц/га. На следующем графике (см. рис. 4) видно, что сорняки более динамично реагируют на технологические операции оптимальной программы, где стимулирование минеральными удобрениями и поливами вызывает рост биомассы сорняков, который подавляется дозами обработок гербицидами. При этом в агроценозе проявляется общая тенденция к снижению биомассы сорняков к концу периода вегетации.

По результатам апробации задачи можно утверждать, что предложенный алгоритм и специализированный программный комплекс обладают характеристиками, достаточными для применения этой разработки в качестве средства интеллектуальной поддержки специалиста-агронома.

Алгоритм и программный комплекс, разработанные нами, соответ-

ствуют концепции превентивного управления, которое рассматривается как основной перспективный подход в мероприятиях по защите посевов от сорняков (20).

В литературе представлен ряд моделей, которые позволяют с определенной степенью достоверности количественно оценить вероятность результатов для принятия обоснованных решений, сравнивать различные методы управления и выбирать варианты с наибольшим долгосрочным эффектом в отношении целевой группы применительно к сельскохозяйственным объектам (20). Избранные примеры дают общее представление о моделях, описывающих распространение сорной растительности в посевах, использовании таких моделей в ключевых областях управления в растениеводстве, полученных количественных выводах и прагматических результатах (20). Однако важно признать, что лишь небольшая часть моделей (включая когда-либо разработанные СППР) широко применялась для решения реальных проблем борьбы с вредными организмами (38-41). Главными причинами называют то, что практические специалисты считают модели не соответствующими местным условиям и не располагают временем для изучения типовых операционных процедур; в моделях не учитываются изменения, происходящие в структуре и численности популяций сорных растений, в экономике растениеводства, недостаточно поддерживаются стандарты программного обеспечения (50-53).

Как видно из анализа доступных публикаций, все известные до настоящего времени модели предназначены для отдельных систем в земледелии и растениеводстве (культурные растения—сорняки, культурные растения—удобрения, сорняки—гербициды). Нами поставлена и решена принципиально новая задача и разработана программа единого управления агроценозом (система культурные растения—сорняки—удобрения—гербициды), объединяющая перечисленные частные задачи. Новизна изобретения подтверждена патентом РФ № 2772889 «Способ одновременного дифференцированного внесения жидких минеральных удобрений и гербицидов и устройство для его осуществления» (от 26.05.2022). Результаты апробации показали возможность применения этой разработки в производственных условиях.

Таким образом, нами предложена новая теория программного управления агроценозом, ориентированная на реализацию технологической идеи совместного внесения минеральных удобрений и обработок гербицидами. Она включает новые математические модели параметров состояния возделываемой культуры и сорной растительности в составе агроценоза, а также новые алгоритмы формирования оптимальных программ управления. Алгоритмы представляют собой четырехэтапную процедуру последовательного формирования программы потенциального развития посева культуры, формирования последовательности технологических операций без учета обработок гербицидами и программы последовательности обработок гербицидами, проводимыми вместе с внесением удобрений и поливами, а также коррекцию программ технологических операций по программе обработок гербицидами. Предложенный алгоритм формирования оптимальных программ управления позволяет избежать проблемы большой размерности и сложности общей задачи управления и обеспечить его устойчивость, достижение заданной урожайности культуры и минимизации биомассы сорной растительности. Полученные результаты являются существенным вкладом в современную цифровизацию и интеллектуализацию управления агротехнологиями в точном земледелии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Михайленко И.М. *Теоретические основы и техническая реализация управления агротехнологиями*. СПб, 2017.
2. Михайленко И.М., Тимошин В.Н. Программное управление параметрами состояния почвы под посевами яровой пшеницы. *Агрехимия*, 2020, 8: 86-93 (doi: 10.31857/S0002188120080062).
3. 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, 2006.
4. Емельянов Ю.Я., Копылов Е.В., Кириллова Е.В. Эффективность гербицидов в сочетании с удобрениями на яровой пшенице. *Нивы Зауралья*, 2014, 6(106): 18-23.
5. Корсаков К.В., Стрижков Н.И., Пронько В.В. Совместное применение удобрений, гербицидов и регуляторов роста при возделывании овса и проса в Поволжье. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*, 2013, 4(120): 24-32.
6. Казаков И.Е. *Методы оптимизации стохастических систем*. М., 1987.
7. Jouven M., Carrère P., Baumont R. Model predicting dynamics of biomass, structure and digestibility of herbage in managed permanent pastures. 1. Model description. *Grass & Forage Science*, 2006, 61(2): 112-124 (doi: 10.1111/j.1365-2494.2006.00517.x).
8. Oliver M. An overview of precision agriculture. In: *Precision agriculture for sustainability and environmental protection* /M. Oliver, T. Bishop, B. Marchant (eds.). Routledge, 2013: Chapter 1 1-17 (doi: 10.4324/9780203128329).
9. Sanderson M.A., Rotz C.A., Fultz S.W., Rauburn E.B., Estimating forage mass with a commercial capacitance meter, rising plate meter, and pasture ruler. *Agronomy Journal*, 2001, 93: 1281-1286 (doi: 10.2134/agronj2001).
10. Roudier P., Tisseyre, B., Poilvé, H., Roger J.-M. A technical opportunity index adapted to zone-specific management. *Precision Agriculture*, 2011, 12: 130-145 (doi: 10.1007/s11119-010-9160-y).
11. Kim K., Chavas J.P. Technological change and risk management: an application to the economics of corn production. *Agricultural Economics*, 2003, 29(2): 125-142 (doi: 10.1016/S0169-5150(03)00081-1).
12. Derby N.E., Casey F.X.M., Franzen D.E. Comparison of nitrogen management zone delineation methods for corn grain yield. *Agronomy Journal*, 2007, 99(2): 405-414 (doi: 10.2134/agronj2006.0027).
13. Heatherly L.G., Elmore T.W. Managing inputs for peak production. In: *Soybeans: improvement, production and uses* /J.E. Specht, H.R. Boerma (eds.). ASA-CSSA-SSSA, Madison, 2004: 451-536 (doi: 10.2134/agronmonogr16.3ed.c10).
14. Paoli J.N., Tisseyre B., Strauss O., McBratney A. A technical opportunity index based on the fuzzy footprint of a machine for site-specific management: an application to viticulture. *Precision Agriculture*, 2010, 11: 379-396 (doi: 10.1007/s11119-010-9176-3).
15. Sun W., Whelan B., McBratney A., Minasny B. An integrated framework for software to provide yield data cleaning and estimation of an opportunity index for site-specific crop management. *Precision Agriculture*, 2013, 14: 376-391 (doi: 10.1007/s11119-012-9300-7).
16. Tisseyre B., McBratney A.B. A technical opportunity index based on mathematical morphology for site-specific management: an application to viticulture. *Precision Agriculture*, 2008, 9: 101-113 (doi: 10.1007/s11119-008-9053-5).
17. Bohanec M., Cortet J., Griffiths B., Žnidaršič M., Debeljak M., Caul S., Thompson J., Krogh P.H. A qualitative multi-attribute model for assessing the impact of cropping systems on soil quality. *Pedobiologia*, 2007, 51(3): 239-250 (doi: 10.1016/j.pedobi.2007.03.006).
18. Steven M. Satellite remote sensing for agricultural management: opportunities and logistic constraints. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1993, 48(4): 29-34 (doi: 10.1016/0924-2716(93)90029-M).
19. Bohanec M., Cortet J., Griffiths B., Žnidaršič M., Debeljak M., Caul S., Thompson J., Krogh P.H. A qualitative multi-attribute model for assessing the impact of cropping systems on soil quality. *Pedobiologia*, 2007, 51(3): 239-250 (doi: 10.1016/j.pedobi.2007.03.006).
20. Bagavathiannan M.V., Beckie H.J., Chantre G.R., Gonzalez-Andujar J.L., Leon R.G., Neve P., Poggio S.L., Schutte B.J., Somerville G.J., Werle R., Van Acker R. Simulation models on the ecology and management of arable weeds: structure, quantitative insights, and applications. *Agronomy*, 2020, 10: 1611 (doi: 10.3390/agronomy10101611).
21. Sattin M., Zanin G., Berti A. Case history for weed competition/population ecology: velvetleaf (*Abutilon theophrasti*) in corn (*Zea mays*). *Weed Technology*, 1992, 6(1): 213-219 (doi: 10.1017/S0890037X00034588).
22. Spitters C.J.T., Krop M., de Groot W. Competition between maize and *Echinochloa crus-galli* analysed by a hyperbolic regression model. *Annals of Applied Biology*, 1989, 115: 541-551 (doi: 10.1017/S00218758000034588).

- 10.1111/j.1744-7348.1989.tb06576.x).
23. Cousens R. An empirical model relating crop yield to weed and crop density and a statistical comparison with other models. *The Journal of Agricultural Science*, 1985, 105(3): 513-521 (doi: 10.1017/S0021859600059396).
  24. Colbach N., Collard A., Guyot S.H.M., Meziere D., Munier-Jolain N. Assessing innovative sowing patterns for integrated weed management with a 3D crop:weed competition model. *European Journal of Agronomy*, 2014, 53: 74-89 (doi: 10.1016/j.eja.2013.09.019).
  25. Christensen S. Crop weed competition and herbicide performance in cereal species and varieties. *Weed Research*, 1994, 34(1): 29-36 (doi: 10.1111/j.1365-3180.1994.tb01970.x).
  26. Krop M.J., Spitters J.T. A simple model of crop loss by weed competition from early observations on relative leaf area of the weeds. *Weed Research*, 1991, 31(2): 97-105 (doi: 10.1111/j.1365-3180.1991.tb01748.x).
  27. Afifi M., Swanton C. Early physiological mechanisms of weed competition. *Weed Science*, 2012, 60(4): 542-551 (doi: 10.1614/WS-D-12-00013.1).
  28. Ziska L.H. Could recent increases in atmospheric CO<sub>2</sub> have acted as a selection factor in *Avena fatua* populations? A case study of cultivated and wild oat competition. *Weed Research*, 2017, 57(6): 399-405 (doi: 10.1111/wre.12271).
  29. Wiles L.J., King R.P., Sweizer E.E., Lybecker D.W., Swinton S.M. GWM: General weed management model. *Agricultural Systems*, 1996, 50(4): 355-376 (doi: 10.1016/0308-521X(95)00016-X).
  30. Parsons D.J., Benjamin L.R., Clarke J., Ginsburg D., Mayes A., Milne A.E., Wilkinson J. Weed-manager—a model-based decision support system for weed management in arable crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2009, 65(2): 155-167 (doi: 10.1016/j.compag.2008.08.007).
  31. Oriade C., Forcella F. Maximizing efficacy and economics of mechanical weed control in row crops through forecasts of weed emergence. *Journal of Crop Production*, 1999, 2(1): 189-205 (doi: 10.1300/9785537).
  32. Scursoni J.A., Forcella F., Gunsolus J. Weed escapes and delayed weed emergence in glyphosate-resistant soybean. *Crop Protection*, 2007, 26(3): 212-218 (doi: 10.1016/j.cropro.2006.04.028).
  33. Schutte B.J., Hager A.C., Davis A.S. Respray requests on custom-applied, glyphosate-resistant soybeans in Illinois: How many and why. *Weed Technology*, 2010, 24(4): 590-598 (doi: 10.1614/WT-D-10-00026.1).
  34. Nowell L.H., Moran P.W., Schmidt T.S., Norman J.E., Nakagaki N., Shoda M.E., Mahler B.J., Van Metre P.C., Stone W.W., Sandstrom M.W., Hladik M.L. Complex mixtures of dissolved pesticides show potential aquatic toxicity in a synoptic study of Midwestern U.S. streams. *Science of the Total Environment*, 2018, 613-614: 1469-1488 (doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.156).
  35. Pandey S., Medd R.W. A stochastic dynamic programming framework for weed control decision making: an application to *Avena fatua* L. *Agricultural Economics*, 1991, 6(22): 115-128 (doi: 10.1016/0169-5150(91)90020-L).
  36. Lodovichi M.V., Blanco A.M., Chantre G.R., Bandoni J.A., Sabbatini M.R., Vigna M., López R., Gigón R. Operational planning of herbicide-based weed management. *Agricultural Systems*, 2013, 121: 117-129 (doi: 10.1016/j.agsy.2013.07.006).
  37. Berti A., Bravin F., Zanin G. Application of decision-support software for postemergence weed control. *Weed Science*, 2003, 51(4): 618-627 (doi: 10.1614/0043-1745(2003)051[0618:AODSFP]2.0.CO;2).
  38. Wilkerson G.C., Wiles L.J., Bennett A.C. Weed management decision models: Pitfalls, perceptions, and possibilities of the economic threshold approach. *Weed Science*, 2002, 50(4): 411-424 (doi: 10.1614/0043-1745(2002)050[0411:WMDMPP]2.0.CO;2).
  39. Lindsay K., Popp M., Norsworthy J., Bagavathiannan M., Powles S., Lacoste M. PAM: decision support for long-term Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) control. *Weed Technology*, 2017, 31(6): 915-927 (doi: 10.1017/wet.2017.69).
  40. Lacoste M., Powles S. Beyond modeling: considering user-centered and post-development aspects to ensure the success of a decision support system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 121: 260-268 (doi: 10.1016/j.compag.2016.01.003).
  41. Kristensen K., Rasmussen I.A. The use of Bayesian network in the design of a decision support system for growing malting barley without use of pesticides. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, 32: 197-217 (doi: 10.1016/S0168-1699(02)00007-8).
  42. Neuhoﬀ D., Schulz D., Köpke U. Potential of decision support systems for organic crop production: WECOF-DSS, a tool for weed control in winter wheat. In: *Proceedings of the International Scientific Conference on Organic Agriculture, Adelaide, Australia, 21-23 September 2005*. Adelaide, 2005: 1-4.
  43. Zambrano-Navea C., Bastida F., Gonzalez-Andujar J.L. A cohort-based stochastic model of the population dynamic and long-term management of *Conyza bonariensis* in fruiting tree crops. *Crop Protection*, 2016, 80: 15-20 (doi: 10.1016/j.cropro.2015.10.023).
  44. Bennett A.C., Price A.J., Sturgill M.C., Buol G.S., Wilkerson G.C. HADSS, Pocket HERB, and Web HADSS: decision aids for field crops. *Weed Technology*, 2003, 17(2): 412-420 (doi:



- 10.1614/0890-037X(2003)017[0412:HPHAWD]2.0.CO;2).
45. Lyon L.L., Keeling J.W., Dotry P.A. Evaluation and adaptation of the HADSS® computer program in Texas Southern High Plains cotton. *Weed Technology*, 2004, 18(2): 315-324 (doi: 10.1614/WT-03-069R).
  46. Ford A.J., Dotray P.A., Keeling J.W., Wilkerson J.B., Wilcut J.W., Gilbert L.V. Site-specific weed management in cotton using WebHADSS. *Weed Technology*, 2011, 25(1): 107-112 (doi: 10.1614/WT-D-10-00060.1).
  47. Gonzalez-Andujar J.L., Fernandez-Quintanilla C., Bastida F., Calvo R., Izquierdo J., Lezaun J.A. Assessment of a decision support system for chemical control of annual ryegrass (*Lolium rigidum*) in winter cereals. *Weed Research*, 2011, 51(3): 304-309 (doi: 10.1111/j.1365-3180.2011.00842.x).
  48. Gonzalez-Andujar J.L., Fernandez-Quintanilla C., Bastida F., Calvo R., Gonzalez-Diaz L., Izquierdo J., Lezaun J.A., Perea F., Sanchez del Arco M.J., Urbano J.M. Field evaluation of a decision support system for herbicidal control of *Avena sterilis* ssp. *ludoviciana* in winter wheat. *Weed Research*, 2010, 50(1): 83-88 (doi: 10.1111/j.1365-3180.2009.00744.x).
  49. Bessette D., Wilson R., Beaudrie C., Schroeder C. An online decision support tool to evaluate ecological weed management strategies. *Weed Science*, 2019, 67(4): 463-473 (doi: 10.1017/wsc.2019.21).
  50. Benjamin L.R., Milne A.E., Parsons D.J., Cussans J., Lutman P.J.W. Using stochastic dynamic programming to support weed management decisions over a rotation. *Weed Research*, 2009, 49(2): 207-216 (doi: 10.1111/j.1365-3180.2008.00678.x).
  51. Lacoste M., Powles S. RIM: Anatomy of a weed management decision support system for adaptation and wider application. *Weed Science*, 2015, 63(3): 676-689 (doi: 10.1614/WS-D-14-00163.1).
  52. Jørgensen L.N., Noe E., Langvad A.M., Jensen J.E., Ørum J.E., Rydahl P. Decision support systems: barriers and farmers' need for support. *EPPO Bulletin*, 2007, 37(2): 374-377 (doi: 10.1111/j.1365-2338.2007.01145.x).
  53. Kanatas P., Travlos I.S., Gazoulis I., Tataridas A., Tsekoura A., Antonopoulos N. Benefits and limitations of decision support systems (DSS) with a special emphasis on weeds. *Agronomy*, 2020, 10(4): 548 (doi: 10.3390/agronomy10040548).

ФГБНУ Агрофизический научно-исследовательский институт,

195220 Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14,  
e-mail: [ilya.mihailenko@yandex.ru](mailto:ilya.mihailenko@yandex.ru) ✉, [vtimoshin@yandex.ru](mailto:vtimoshin@yandex.ru)

Поступила в редакцию  
28 января 2022 года

*Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology]*, 2022, V. 57, № 3, pp. 500-517

## PROGRAM LEVEL OF AGROCENOSIS MANAGEMENT, TAKING INTO ACCOUNT THE IMPACT OF WEEDS ON CROPS

I.M. Mikhailenko✉, V.N. Timoshin

*Agrophysical Research Institute*, 12, Grazhdansky Prospekt, St. Petersburg, 195220 Russia, e-mail [ilya.mihailenko@yandex.ru](mailto:ilya.mihailenko@yandex.ru)  
(✉ corresponding author), [vtimoshin@yandex.ru](mailto:vtimoshin@yandex.ru)

ORCID:

Mikhailenko I.M. [orcid.org/0000-0002-6181-0686](https://orcid.org/0000-0002-6181-0686)

Timoshin V.N. [orcid.org/0000-0002-3088-958X](https://orcid.org/0000-0002-3088-958X)

The authors declare no conflict of interests

Received January 28, 2022

doi: 10.15389/agrobiol.2022.3.500eng

### Abstract

In modern crop production, a traditional paradigm of separate management of crops and weeds as part of single agrocenosis dominates. However, mineral fertilizers simultaneously stimulates the growth and development of crops and weeds, and herbicides suppress the growth of both cultivated plants and weeds. This leads to significant yield losses and waste of fertilizers and herbicides. The purpose of this study is to develop a theoretical basis for solving the problem of managing agrocenoses, which include the main crop and weeds. The solution of this problem is aimed at eliminating the limitations of the existing paradigm of separate management of crops and weeds in the agrocenosis. Previously, we have developed a theory of management of agro-technologies, in which the object of management is an agricultural crop without considering the role of weeds in the agrocenoses. In accordance with this theory, the crop management is carried out at strategic, program and real-time levels. In the presented work, for the first time, the problem of managing agrocenoses at the program level during one growing season is posed and solved. The essence of the approach lies in the development of the programs, which are sequences of technological operations for the application of mineral

fertilizers, irrigation and herbicide treatments, providing a given crop yield with minimal expenditure of resources. To solve this problem, in the previously developed theory, mathematical models for crop parameters are modified to reflect the effect of herbicides. In addition, a model of the parameters of dominant weed species was introduced into the control task, in which, in addition to the doses of herbicide treatments, the effect of the doses of mineral fertilizers is reflected. The mathematical model for the soil environment, which takes into account the influence of the parameters of the state of the cultivated crop and weeds, has also undergone significant refinement. The problem is solved on the example of sowing spring wheat as part of an agrocenoses. The presence of several spring wheat phenological phases needs to transform the structure and parameters of the mathematical models used for all phenophases. This, in turn, needs to solve the problem of forming optimal programs for managing agrocenoses separately for each interphase period and combine the received private programs into a single program. As a method for solving the problem, the Pontryagin's maximum principle is used in combination with a dynamic programming scheme (from the end of the growing season to its beginning). The structural complexity of the control object, which is an agricultural field with agrocenoses, necessitates solving the problem of program control in three stages. At the first stage, a program is formed to change the parameters of the soil environment, which ensures the achievement of the required crop yield. At this stage, the effect of herbicide treatments on the state of crop sowing is not considered. At the second stage, a sequence of technological operations is found that provides the best approximation of soil parameters to the optimal program obtained at the first stage. Finally, at the third stage, the optimal sequence of herbicide treatments performed simultaneously with other technological operations is found. To consider the influence of these processing, the programs obtained at the first two stages are refined until the convergence of the solution of the entire problem is obtained.

Keywords: program control, agrocenoses, mineral fertilizers, herbicides, mathematical models, control algorithms.