



Комплексный подход к решению задач планирования в кормопроизводстве

© 2025, А.И. Семёнов ✉, Б.В. Соколов, А.В. Спесивцев

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН (СПб ФИЦ РАН),
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Рассмотрен комплексный подход к решению задачи планирования процесса уборки трав, являющийся заключительным этапом процесса кормопроизводства. Автоматизация решения задач планирования уборки трав включает составление расписания работ сельскохозяйственных кормоуборочных технических средств для выполнения технологических операций. Она основана на синтезе принципиально различающихся математических подходов к описанию и решению задачи теории расписаний в условиях трудной формализуемости и слабой структурированности объекта исследования. Разработанный подход включает онтологические, логико-динамические и нечётко-возможностные модели, методы и алгоритмы. Онтологии представляют модели знаний о взаимосвязанных процессах в рассматриваемой предметной области. В логико-динамических моделях оперативно-календарного планирования описываются ограничения и факторы, существующие в процессе уборки трав, а также определяется наиболее предпочтительный вариант технологии. Нечётко-возможностные модели стратегического планирования включают описание качественных и количественных факторов и процессов в рассматриваемой предметной области, позволяющих предварительно определить объём необходимых ресурсов для решения задачи. Совокупность применяемых моделей позволяет формально представить исследуемую предметную область, возможные сценарии учёта возмущающих воздействий и сформулировать задачу планирования уборки трав как задачу оптимального управления. Разработан прототип системы поддержки принятия решений, предназначенной для помощи при планировании и реализации процесса уборки трав.

Ключевые слова: кормопроизводство, онтология, нечётко-возможностная модель, логико-динамическое моделирование, планирование, технология уборки трав.

Цитирование: Семёнов А.И., Соколов Б.В., Спесивцев А.В. Комплексный подход к решению задач планирования в кормопроизводстве. *Онтология проектирования*. 2025. Т.15, №2(56). С.198-210. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-198-210.

Финансирование: исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-19-00823: «Разработка научных основ и интеллектуальной технологии создания и применения интегрированной автоматизированной системы проактивного мониторинга сложных агробиотехнических объектов».

Благодарности: авторы выражают благодарность Потрясаеву С.А. за разработку программного обеспечения.

Вклад авторов: Семёнов А.И. – решение задачи оперативно-календарного планирования; первоначальный текст статьи. Соколов Б.В. – концепция полимодельного описания; логико-динамическая модель оперативно-календарного планирования; онтологическая модель; финальное редактирование текста статьи. Спесивцев А.В. – нечётко-возможностная ресурсная модель; редактирование текста статьи. Все авторы прочитали и согласились с основным текстом рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Процесс кормопроизводства (КМП) связывает растениеводство и животноводство, оказывая значительное влияние на развитие сельскохозяйственного предприятия (СХП) [1, 2].

В настоящее время управленческие решения при планировании технологических процессов в КМП принимаются в неавтоматизированном режиме специалистами на основе их практических навыков и теоретической подготовки. Большое число факторов, влияющих на качество планирования, не может быть своевременно проанализировано специалистами по КМП, что приводит к формированию недостаточно обоснованных планов и к снижению качества продукции, выпускаемой СХП. Перспективным направлением совершенствования процессов КМП является автоматизация и интеллектуализация планирования и управления КМП [3, 4].

Планирование КМП относится к классу задач теории расписаний, которые получили широкое распространение в различных предметных областях (ПрО) [5]. В данной статье рассматривается завершающий этап КМП – уборка трав (УТ). Под планированием УТ понимается процесс распределения сельскохозяйственных кормоуборочных ресурсов (СКР) для достижения поставленных целей по УТ при условии выполнения пространственно-временных, технологических, технических, ресурсных и организационных ограничений [7].

Известны виды планирования (стратегическое, календарное, тактическое и оперативное), где главное внимание уделяется процессам взаимодействия сложного объекта (в данном случае СКР) [7]. Стратегическое (объёмное) планирование заключается в прогнозировании объёмов и качества заготавливаемых кормов; оперативно-календарное планирование – в составлении для конкретного интервала времени расписания работ СКР, входящих в состав соответствующих технологических операций, а также в выборе наиболее предпочтительной последовательности операций, обеспечивающих эффективность процессов УТ.

При решении задач планирования в СХП широко используются мультиагентные технологии [5, 9], позволяющие осуществлять адаптацию плана к возмущающим воздействиям в процессе функционирования СХП. За счёт адаптивности и самоорганизации процессов синтеза плана и его коррекции эта технология зарекомендовала себя успешной при практической реализации. Открытыми остаются вопросы оптимальности и устойчивости планов, полученных с помощью этой технологии.

При планировании КМП с использованием имитационных моделей на основе эвристических правил удаётся преодолевать проблемы большой размерности, нестационарности, нелинейности и учёта НЕ-факторов в ходе поиска вариантов распределения ресурсов СХП. Однако, как и в случае использования мультиагентных технологий [10], вопросы поиска оптимальных планов и оценивания их устойчивости и робастности остаются открытыми [11].

Анализ существующих подходов к постановке и решению задач планирования КМП показал, что целесообразно использовать комплексное описание, поскольку каждая из используемых моделей (логико-динамические модели (ЛДМ) программного управления, нечётково-возможностные (НВМ) и онтологические модели (ОМ)) обладает своими достоинствами и ограничениями, что позволяет при реализации технологии системного моделирования взаимно усилить достоинства частных моделей и уменьшить их издержки из-за соответствующих ограничений [12, 13].

1 Технология уборки трав

Процесс КМП включает следующие этапы [14, 15]: основная обработка почвы; внесение органических удобрений; внесение минеральных удобрений; подготовка семян к посеву; предпосевная подготовка почвы; посев семян трав; уход за растениями; УТ на силос. Каждый этап выполняется последовательно в агробиологический срок соответствующими ресурсами, которыми располагает СХП.

Технологическая карта УТ представлена на рисунке 1 [15-17]. Эта карта содержит последовательность многовариантной технологической цепочки достижения конечного результата

– готовый силос. В ней отмечены условия перехода между вариантами технологии. Выбор варианта технологии УТ определяется группой факторов, которые можно отнести к трудно-предсказуемым, трудноформализуемым и трудноинтерпретируемым. Так, погодные условия могут вызвать задержку заданного срока выполнения какой-либо операции, приводя травостой к перерастанию, и, следовательно, к снижению качества УТ. Влияние болезней, вредителей, ошибок людей, занятых в КМП, также трудно формализуется.

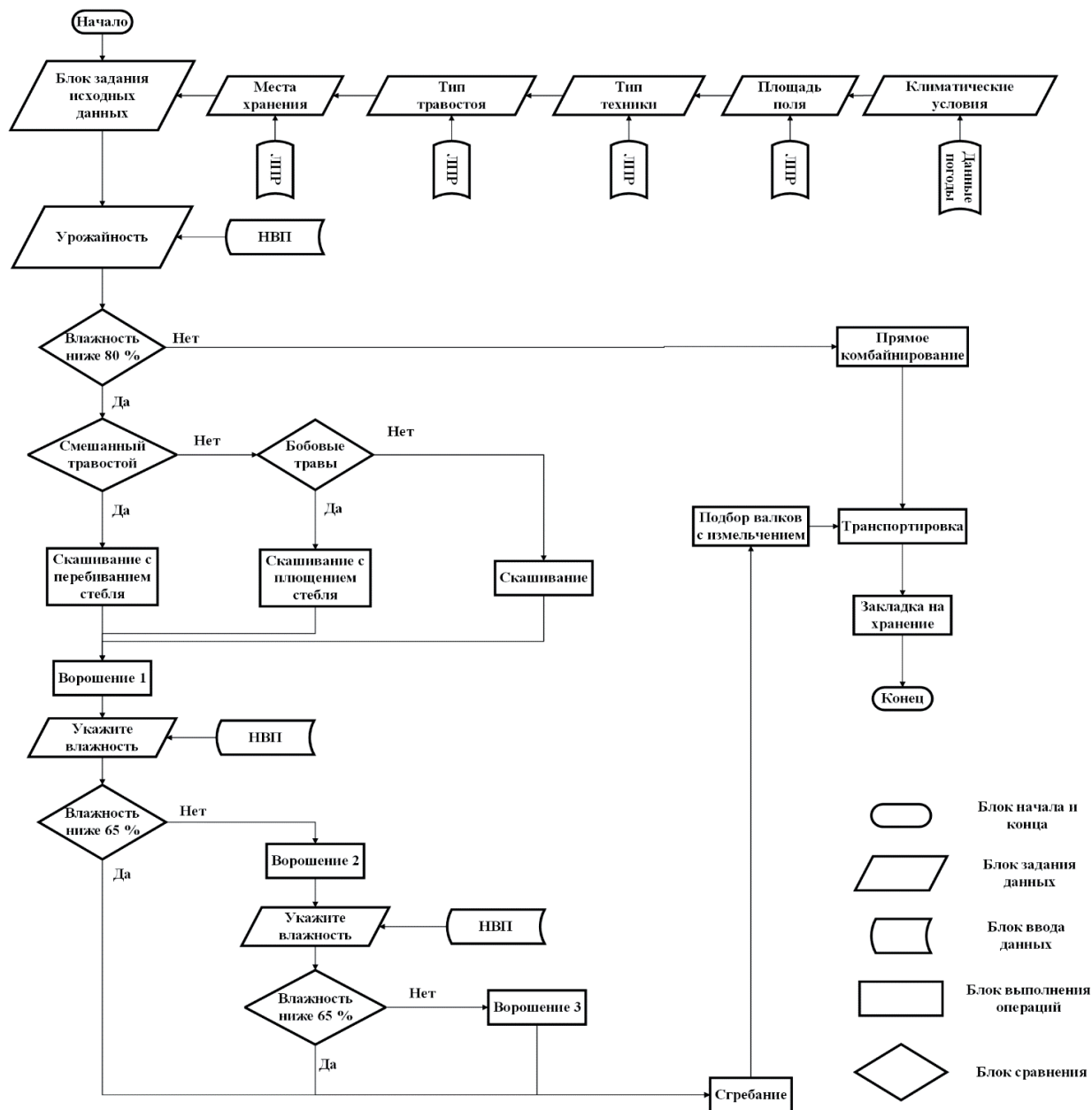


Рисунок 1 – Технологическая карта уборки трав на силос
(НВП - нечётко-возможностный подход, ЛПР - лицо, принимающее решения)

На практике принятие управленческих решений, связанных с выбором технологии в конкретном месте в конкретный момент времени, а также составление оперативного плана работ СКР лежит на лицах, принимающих решения (ЛПР) и обладающих знаниями в этой ПрО. ЛПР встречаются с трудностями, связанными с различными ограничениями, в т.ч. с неопределённостью информации об объекте и его функционировании.

Чтобы решить задачу объёмно-календарного планирования функционирования сложного объекта (КмП и УТ) предлагается использовать несколько подходов: построение ОМ представления знаний об объекте; построение многофакторных моделей объёмного планирования КмП на основе НВМ для формализации знаний о качественных и количественных факторах, включая возмущающие воздействия среды; разработка оптимизационной модели и алгоритма решения задачи оперативно-календарного планирования УТ с учётом возможных возмущающих факторов, влияющих на устойчивость и робастность синтезированных планов.

2 Модели уборки трав

2.1 Онтологическая модель

Создаваемые системы поддержки принятия решений (СППР) должны основываться на базах данных и базах знаний (БЗ) высококвалифицированных специалистов. При построении БЗ используются продукционные модели, семантические сети, фреймовые модели, онтологии и др. [18]. Например, производственные объекты можно представлять в виде абстрактных функциональных понятий [19].

Первым шагом к структуризации ПрО является разработка ОМ представления знаний об имеющихся в ней взаимосвязанных процессах. При создании ОМ описываются главные факторы и показатели эффективности, определяющие основное назначение моделируемого объекта, упорядочиваются цели и задачи деятельности. В системе управления сложным объектом ОМ позволяет установить отношения и представить их графически вместе с описанием базовых понятий ПрО, которые в дальнейшем получают формальное описание в конкретных моделях планирования [20].

На рисунках 2 и 3 (использован *Protégé*), показана ОМ, её основные концепты и их отношения применительно к технологии КмП из трав (рисунок 2) и к процессу УТ на силос (рисунок 3). В основу ОМ положены базовые понятия, которые используются при построении НВМ с целью внести дополнительные экспертные знания в общую концепцию планирования процесса УТ. Основные факторы, содержащиеся в НВМ, отображены в онтологии на рисунке 3. К ним относятся: вид скашивания, вид хранения, технологический ресурс. В онтологию внесены показатели качества, используемые в ЛДМ, например, своевременность исполнения работ.

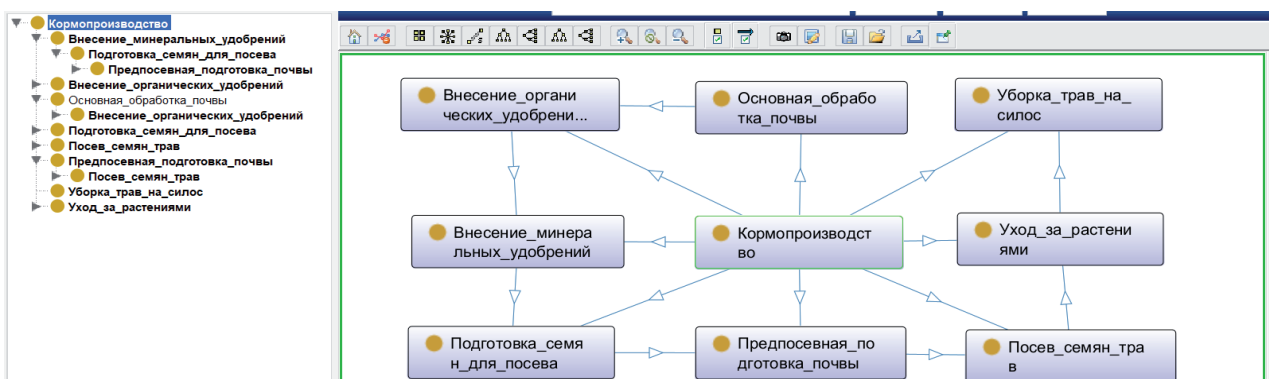


Рисунок 2 – Онтологическое представление технологии производства кормов из трав

Представленные результаты ОМ объединяют в технологическом представлении (графе) данные, информацию и знания о КмП, описание их структуры, а также логику их обработки и использования. Это позволило при разработке прототипа СППР обеспечить интеграцию

разработанных математических моделей объёмного и оперативно-календарного планирования КмП на алгоритмическом уровне, а на концептуальном уровне выполнить условия согласованности соответствующих отношений (ограничений) [21, 22].

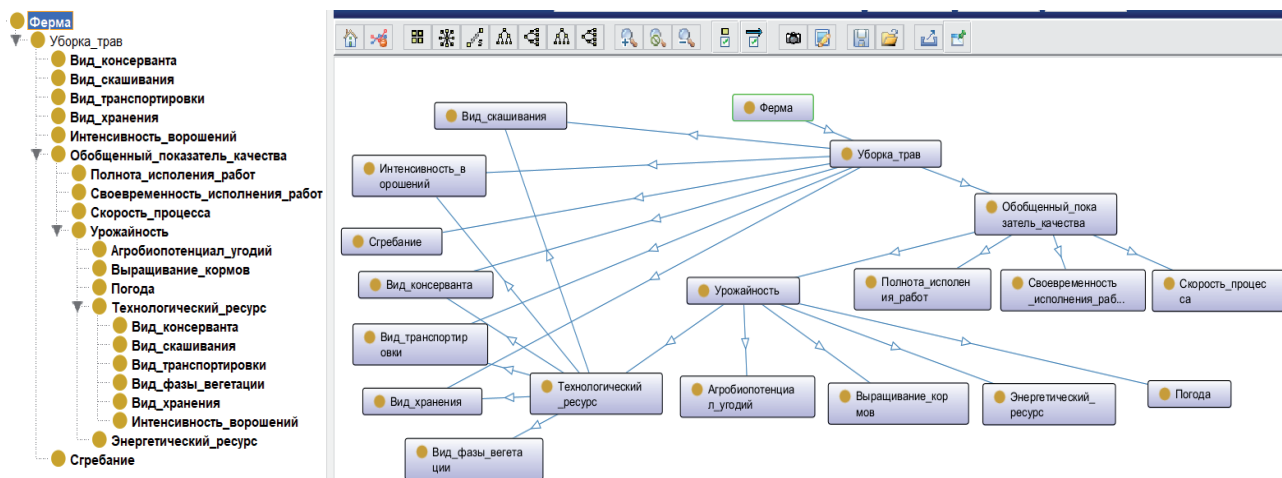


Рисунок 3 – Онтологическое представление процесса уборки трав на силос

2.2 Нечётко-возможностная ресурсная модель

Процесс УТ зависит от внешних факторов, имеющих качественное (вербальное, органолептическое) описание и сложное формальное представление. Результаты стратегического планирования УТ влияют на прогнозные значения урожайности выпускаемой продукции и её качество. При построении ресурсной модели КмП предлагается использовать НВМ, основанные на элементах нечёткой логики, экспертных знаниях и теории планирования экспериментов [23]. Представленные производственными правилами экспертные знания могут быть связаны между собой с помощью математического аппарата теории планирования экспериментов. Строкам матрицы опроса экспертов будут соответствовать нечёткие производственные правила, отражающие главные характеристики сложного объекта и его поведение в многомерном пространстве лингвистических переменных. Основные шаги процедуры построения обобщённой ресурсной модели КмП включают [23]:

- выявление и определение факторного пространства исследуемого объекта или явления;
- выявление интервала значений по каждому фактору. На рисунке 4 для одного из факторов, учитываемых при построении модели, принят интервал $[-1; +1]$. Здесь «-1» соответствует состоянию трав, не готовых к уборке «низкое (Н)»; «+1» - состояние трав, созревших для уборки «высокое (В)»;
- поиск целевой функции (обобщённого показателя качества) Y , компоненты которой описывают взаимосвязи факторов (переменных) между собой и с функцией;
- разработка опросной экспертной матрицы, в строки которой входят факторы, оказывающие наибольшее влияние на исследуемый объект;
- выполнение экспертного опроса на основе построенной опросной матрицы, в которой представлены все значения лингвистических переменных, определяющих факторное пространство;
- преобразование вербальных оценок экспертов в числовую форму с последующей обработкой числовой информации методами теории планирования экспериментов;

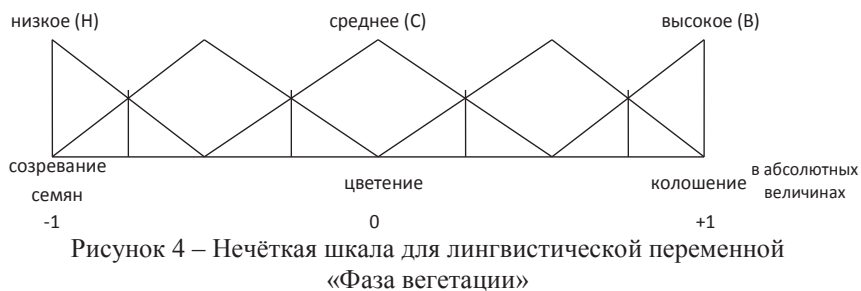


Рисунок 4 – Нечёткая шкала для лингвистической переменной «Фаза вегетации»

- оценка значимости полученных числовых коэффициентов в аналитической модели Y;
- проверка адекватности расчётов полученной модели на соответствие реальному состоянию объекта.

По итогам опросов экспертов применительно к типовым технологическим картам КМП выделены наиболее существенные факторы, определяющие качество заготовленного силоса. В результате выполненных преобразований построена иерархия НВМ, где на верхнем уровне располагается метамодель «Прогнозируемая урожайность». На втором уровне – детальное описание переменных, входящих в метамодель.

Применительно к решаемой задаче объёмного планирования построена модель «Технологический ресурс» [12], с помощью которой можно рассчитать значения показателя технологического ресурса x_3 (МДж/кг) для последующей оценки его влияния на энергетическую питательность заготавливаемых кормов. Данная модель включает следующие переменные: x_{31} – вид фазы вегетации; $\sum_{k=1}^S F_k$ – виды скашивания; $\sum_{w=5}^V F_w$ – варианты технологий (интенсивностей) ворошений; x_{34} – варианты внесения консерванта; x_{35} – варианты досушивания; x_{36} – варианты хранения. $x_{ik}(t_f), x_{iw}(t_f)$ – переменные, характеризующие состояние выполнения операций, связанных с выполнением выбранной технологии УТ. Расчётная модель показателя имеет вид:

$$x_3 = 8,859 + 0,703x_{31} + 0,109 \cdot \frac{1}{2} \left[\frac{\sum_{k=1}^S (a_{ik} - x_{ik}(t_f))^2}{\sum_{k=1}^S a_{ik}^2} \right] + 0,172 \cdot \frac{1}{2} \left[\frac{\sum_{w=5}^V (a_{iw} - x_{iw}(t_f))^2}{\sum_{w=5}^V a_{iw}^2} \right] + 0,359x_{34} + 0,140x_{35} + 0,359x_{36} - 0,109x_{34}x_{35} - 0,131x_{31}x_{34}x_{36} - 0,109 \cdot \frac{1}{2} \left[\frac{\sum_{k=1}^S (a_{ik} - x_{ik}(t_f))^2}{\sum_{k=1}^S a_{ik}^2} \right] \cdot \frac{1}{2} \left[\frac{\sum_{w=5}^V (a_{iw} - x_{iw}(t_f))^2}{\sum_{w=5}^V a_{iw}^2} \right] x_{35}. \quad (1)$$

В этом случае используемая при объёмном планировании процесса КМП метамодель «Прогнозируемая урожайность» Y (т/га), состоящая из пяти базовых нечётких лингвистических переменных, в т.ч. «Технологический ресурс», имеет вид:

$$Y = 10,56 + 2,35x_1 + 4,39x_2 + 3,18x_3 + 1,28x_4 + 1,35x_5 - 0,43x_1x_3 + 0,79x_2x_3 - 0,41x_2x_5 + 0,92x_3x_5 - 0,37x_1x_3x_4 + 0,93x_1x_3x_5, \quad (2)$$

где параметры x характеризуют: x_1 – агробиопотенциал угодий; x_2 – выращивание кормов; x_3 – технологический ресурс; x_4 – материально-техническую базу; x_5 – климатическое влияние.

В моделях (1) и (2) представлены в безразмерном виде только значимые коэффициенты, отражающие экспертные знания и позволяющие связать выделяемые основные ресурсы и факторы с конечным результатом – обобщённым показателем прогнозируемой (либо требуемой) урожайности. НВМ позволяет рассмотреть различные сценарии воздействия возмущающих факторов на конечный результат реализации процесса КМП и обоснованно выделить соответствующие резервы ресурсов для каждого из этапов КМП [23, 24].

2.3 Логико-динамическая модель

Для решения задачи оперативно-календарного планирования процесса УТ разработана ЛДМ [12]. Пусть: $I = \{i_1, i_2, \dots, i_m\}$ – множество типов полей, подлежащих уборке; $K_k^i = \{k_1, k_2, \dots, k_l\}$ – множество операций по УТ на заданном поле; $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ – множество СКР, имеющих в СХП и предназначенных для УТ. В этом случае ЛДМ имеет вид:

$$\begin{aligned} M^{(0)} = \{u(t) | \dot{x}_{ik} = \sum_{r=1}^n e_{ikr}(t) \cdot u_{ikr}; \dot{x}_r = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^l u_{ikr}; x_{ik}(t_0) = 0; x_{ik}(t_f) = a_{ik}; \\ \sum_{r=1}^n u_{ikr} \leq \xi_k P_k, \forall i, \forall k; \sum_{k=1}^l u_{ikr} \leq \xi_r P_r, \forall i, \forall r; u_{ikr}(t) \in \{0,1\}; \xi_k \in \left[\frac{1}{P_k}, 1\right]; \xi_r \in \left[\frac{1}{P_r}, 1\right]; \\ \sum_{r=1}^n u_{ikr} [\sum_{\tilde{\alpha} \in \Gamma_{ik1}} (a_{i\tilde{\alpha}} - x_{i\tilde{\alpha}}(t)) + \prod_{\tilde{\beta} \in \Gamma_{ik2}} (a_{i\tilde{\beta}} - x_{i\tilde{\beta}}(t))] = 0, i = 1, \dots, m; k = 1, \dots, l; r = 1, \dots, n, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^S F_k = \frac{1}{2} \left[\frac{\sum_{k=1}^S (a_{ik} - x_{ik}(t_f))^2}{\sum_{k=1}^S a_{ik}^2} \right]; \sum_{w=5}^V F_w = \frac{1}{2} \left[\frac{\sum_{w=5}^V (a_{iw} - x_{iw}(t_f))^2}{\sum_{w=5}^V a_{iw}^2} \right],$$

где $M^{(0)}$ – ЛДМ, которая включает: частные модели планирования технологических операций и СКР; краевые условия; технические и технологические ограничения; ограничения на управляющее воздействие; логические

ограничения «И» и «ИЛИ»; x_{ik} – переменная, характеризующая состояние выполнения операции K_k^i в ходе реализации процесса УТ; к операциям K_k^i относятся операции: скашивания, ворошения, сгребания, внесения консервирующих добавок, подбор трав, выбор средств транспортировки и выбор места хранения; $e_{ikr}(t)$ – известная матричная временная функция, с помощью которой задаются пространственно-временные ограничения, связанные с возможностью назначить ресурс R на выполнение операции K_k^i в рамках существующих и прогнозируемых пространственно-временных ограничений (данная функция принимает значение 1, если соответствующие ограничения выполняются и 0 – в противном случае); $u_{ikr}=1$, если операции K_k^i выполняются с помощью одного из СКР, входящих в множество R , и 0 – в противном случае; x_r – переменная, характеризующая время задействия СКР R ; $a_{i\tilde{\alpha}}, a_{i\tilde{\beta}}$ – заданные объёмы операций, которые входят в варианты технологий УТ; $\Gamma_{ik1}, \Gamma_{ik2}$ – множества номеров операций, проводимых в рамках операции K_k^i , а также непосредственно предшествующих и технологически связанных с ней с помощью логических операций «И», «ИЛИ»; P_k, P_r – заданные константы, характеризующие технико-технологические ограничения, связанные с возможностью использования материальных и энергетических ресурсов при выполнении различных операций, связанных с УТ; ξ_k, ξ_r – матричные временные функции, которые позволяют задавать в интервальном виде возмущающие воздействия на компоненты процесса УТ со стороны внешней среды, например, возможные варианты воздействия погодных условий (таким же образом могут задаваться воздействия, вызывающие отказы и поломки в СКР, готовность технических сельскохозяйственных агрегатов к функционированию); F_k, F_w – возможные варианты технологий УТ в части вида скашивания, а также вида интенсивности ворошения. С помощью данных функций устанавливаются причинно-следственные связи между построенной НВМ (1) и ЛДМ (3).

Качество выполнения программ планирования УТ как сложного объекта можно оценить с помощью следующих показателей:

$$J_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^l \sum_{r=1}^n \int_{t_0}^{t_f} q_{ikr}(\tau) u_{ikr}(\tau) d\tau; \quad (4)$$

$$J_2 = -\frac{1}{2} \sum_{k=1}^l [a_{ik} - x_{ik}(t_f)]^2; \quad (5)$$

где (4) – функционал, с помощью которого оценивается своевременность выполнения операций при различных условиях, а q_{ikr} – штрафная функция, которая активируется при нарушении сроков какой-либо операции; (5) – показатель качества планирования, характеризующий полноту выполнения технологических операций, входящих в перечень работ, выполняемых при УТ.

Для того, чтобы связать модели объёмного и оперативно-календарного планирования вводится обобщённый показатель качества планирования КмП (в т.ч. и для УТ):

$$J_{об} = \lambda_1 J_1 + \lambda_2 J_2 + \lambda_3 x_3. \quad (6)$$

С использованием разработанной ЛДМ (3) - (5) задача планирования УТ сформулирована как задача оптимального программного управления динамической системой (3), которую надо перевести из заданного начального состояния в заданное конечное состояние с учётом всех пространственно-временных, технических и технологических ограничений. При наличии нескольких фазовых траекторий должна быть выбрана наилучшая, стремящаяся удовлетворить критерии показателей качества вида (4) - (5).

3 Алгоритм решения задач оперативно-календарного планирования

Для задачи оптимального программного планирования УТ одним из эффективных алгоритмов поиска наилучшей из возможных альтернатив является метод последовательных приближений Крылова-Черноусько [25]. Предлагаемая модификация алгоритма включает следующие шаги:

Шаг 1. Преобразование интегральной целевой функции (4) к терминальному виду;

Шаг 2. В качестве начального приближения $u^{(0)}(t)$ задаётся некоторое допустимое программное управление (типовой эвристический план УТ);

Шаг 3. Решается задача Коши для динамической системы вида (3) от начального до конечного моментов времени (определяются для заданного интервала оперативно-календарного планирования) с последующим определением фазовой траектории $x=x^{(k)}(t)$, где k – номер итерации, и определяются значения показателей качества планирования вида (4) и (5) в конечный момент времени;

Шаг 4. Сопряжённая система уравнений интегрируется от конечного к начальному моменту времени (в обратном времени) с начальными условиями, которые определяются из условий трансверсальности

$$\psi_{ik}(t_f) = -\frac{\partial J_{об}}{\partial x_{ik}}, \quad (7)$$

где ψ_{ik} – вспомогательная сопряжённая переменная, рассчитываемая в момент времени t_f , который является моментом завершения интервала планирования УТ.

За счёт (7) данные, информация и знания о процессах КмП, полученные от экспертов и представленные в нечётко-возможностной форме (1) и прошедшие дефаззификацию, включаются в ЛДМ оперативно-календарного планирования УТ.

В результате обратного интегрирования сопряжённой системы уравнений в начальный момент времени t_0 (начало интервала планирования УТ) рассчитывается первое приближение начальных условий для сопряжённой системы уравнений вида $\Psi_i^{(opt)}(t_0)$. На этом шаге «нулевая» итерация завершается и осуществляется переход к основному итерационному циклу поиска оптимального плана УТ;

Шаг 5. Поиск нового управления $u^{(k+1)}(t)$ (плана УТ) осуществляется от начального до конечного моментов времени (в каждый момент времени максимизируется функция Гамильтона и ищется наилучший вариант распределения ограниченных СКР, где вместе с максимизацией функции Гамильтона происходит интегрирование основной и сопряжённой систем уравнений);

Шаг 6. Проводится проверка завершения итерационного цикла поиска оптимального плана УТ с заданной точностью (ε_1) согласно следующему условию

$$|J_0^{(k)}(t_f) - J_0^{(k-1)}(t_f)| < \varepsilon_1. \quad (8)$$

При соблюдении условия (8) программное управление (оперативно-календарный план УТ) считается найденным, и формируется выходной массив результатов планирования $u^*(t)$, $\Psi^*(t)$, $J^{(opt)}$; при невыполнении условия (8) – осуществляется переход на шаг 3 до выполнения условий (8);

Шаг 7. В случае выполнения условия (8) работа алгоритма поиска плана УТ завершается.

4 Результаты оперативно-календарного планирования уборки трав

На основе разработанных моделей и алгоритмов объёмного и оперативно-календарного планирования разработан прототип СППР, с помощью которого решены практические задачи. На рисунках 5 и 6 приведены примеры планов работы СКР. На оси абсцисс показано время, необходимое для выполнения операций, входящих в состав технологического цикла УТ. На оси ординат – технологические операции УТ.

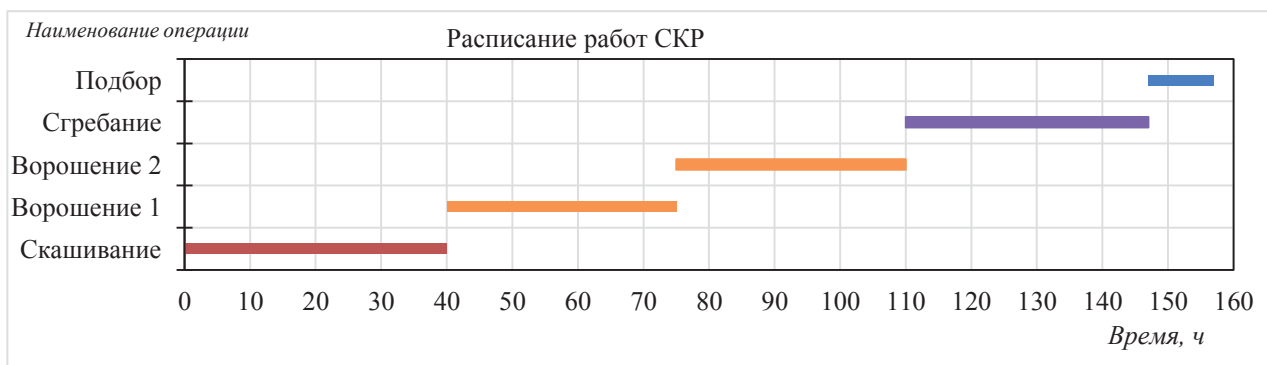


Рисунок 5 – Диаграмма планирования работ СКР при низкой интенсивности исполнения технологических операций

За счёт оптимизации распределения СКР на одном и том же интервале планирования УТ удаётся выполнить на одну операцию ворошения больше (см. рисунок 6), чем при другом (не оптимальном) варианте плана распределения СКР (см. рисунок 5). Особенностью реализации

технологии УТ, представленной на рисунке 6, является более высокие прогнозируемые значения показателя урожайности и технологического ресурса. Результаты расчёта показателей (1) и (2) представлены в таблице 1, где «Н» - низкая, а «В» - высокая интенсивность УТ. Обозначения и переменные, представленные в таблице, соответствуют моделям (1) и (2).

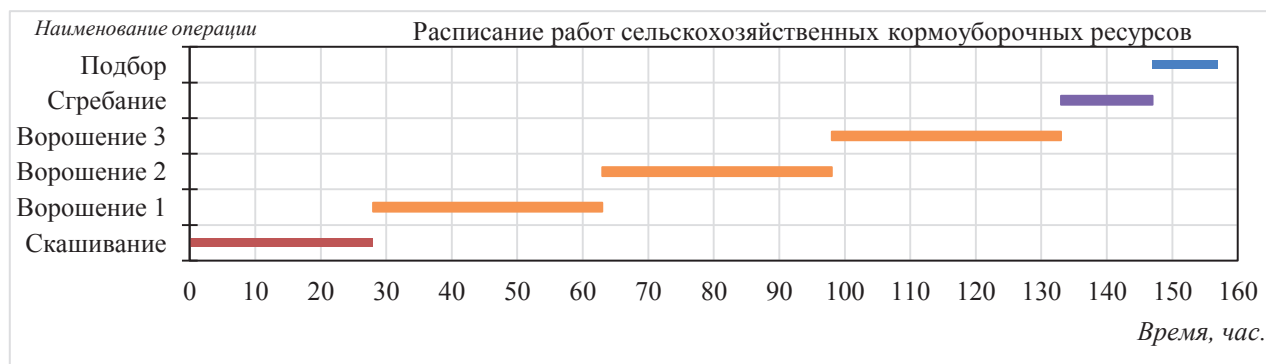


Рисунок 6 – Диаграмма планирования работ сельскохозяйственных кормоуборочных ресурсов при высокой интенсивности исполнения технологических операций

Таблица 1 – Пример расчёта результатов УТ для сценариев с низкой и высокой интенсивностью по (1) и (2)

Интенсивность технологии УТ	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	x_{35}	x_{36}	Технологический ресурс, МДж/кг
Н	0	0	0,5	0	0	0	8,945
В	0	0	1	0	0	0	9,031
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5		Урожайность, т/га
Н	0	0	0	0	0		10,56
В	0	0	1	0	1		16,01

Заключение

Представлен комплексный подход к решению слабо структурированных и трудноформализуемых задач объёмного и оперативно-календарного планирования КмП. Новизна полученных результатов состоит в полимодельном описании данных задач.

В разработанной НВМ КмП в агрегированном количественно-качественном виде учитывается экспертная информация об агробиопотенциале угодий, технологии выращивания кормов, ограничениях, связанных с имеющимися технологическими ресурсами и материально-технической базой, а также параметрах, характеризующих климатическое влияние.

В результате дефазификации в данных моделях для конкретных сценариев изменения внешних условий можно спрогнозировать урожайность кормов и оценить объём необходимых ресурсов. Предложена ЛДМ планирования УТ, позволяющая рассматривать задачу оперативно-календарного планирования как задачу оптимального программного управления. С использованием данной модели за счёт динамической декомпозиции решена исходная задача большой размерности. В ЛДМ предусмотрена возможность учёта возмущающих факторов, влияющих на результаты планирования. Согласование полученных статических и динамических моделей планирования с использованием ОМ обеспечивает на концептуальном уровне связанность основных концептов и ограничений, используемых в каждой из моделей.

Список источников

- [1] **Ибрагимов А.Г.** Значение кормопроизводства в экономике сельского хозяйства России. *Экономика и предпринимательство*. 2019. № 10(111). С.39-41.

- [2] **Kumar S., Singh P., Devi U., Yathish K.R., Saujanya P.L., Kumar R., Mahanta S.K.** An overview of the current fodder scenario and the potential for improving fodder productivity through genetic interventions in India. *Animal Nutrition and Feed Technology*. 2023; 23: 631-644. DOI: 10.5958/0974-181X.2023.00054.9.
- [3] **Balafoutis A.T., Van Evert F.K., Fountas S.** Smart Farming Technology Trends: Economic and Environmental Effects, Labor Impact, and Adoption Readiness. May 2020. *Agronomy* 10 (5): 743. DOI: 10.3390/agronomy10050743.
- [4] **Катаев Ю.В., Герасимов В.С., Тишанинов И.А.** Использование цифровых технологий в инженерной структуре АПК. Материалы XIV Международной научно-практической интернет-конференции «Информ-Агро-2022». Москва, 2022. С.381-387.
- [5] **Скобелев П., Майоров И., Симонова Е., Ларюхин В., Яловенко О.** Вертикальные и горизонтальные переговоры мультиагентных сервисов планирования в мультисервисной платформе управления растениеводством // Труды XXI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», Самара, 03-06 сентября 2019 г. Самара: ОФОРТ, 2019. Т. II. С.46-51.
- [6] **Kalinin V.N., Sokolov B.V.** Multi-model Approach to the Description of the Air-space Facilities Control Process. *Control Theory and process*, 1995, № 1, P.149-156. EDN: KTAVFT.
- [7] **Соколов Б.В.** Динамические модели и алгоритмы комплексного планирования работы наземных технических средств с навигационными космическими аппаратами. *Труды СПИИРАН*. 2010. 2(13), С.7-44.
- [8] **Кононов А.В.** Комбинаторная сложность составления расписаний для работ с простым линейным ростом длительностей. *Дискретный анализ и исследование операций*. 1996. Т.3, №2. С.15-32.
- [9] **Ларюхин В.Б.** Методы и средства сопряжённого взаимодействия автономных интеллектуальных систем распределённого управления ресурсами предприятия. *Онтология проектирования*. 2023. Т.13, №2(48). С.254-273. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-2-254-273.
- [10] **Скобелев П.О., Симонова Е.В., Будаев Д.В., Воицук Г.Ю., Ларюхин В.Б.** Облачная интеллектуальная система SMART FARMING для управления точным земледелием // Материалы конференции «Информационные технологии в управлении (ИТУ-2018)», Санкт Петербург, 2-4 октября 2018 г. Санкт-Петербург: Издательство: «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С.261-270.
- [11] **Волхонская Е.Е.** Задача оптимального назначения автономных транспортных средств в производственно-логистической системе. *Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки*. 2023. Т.31. № 2. С.20-28. DOI: 10.14498/tech.2023.2.2.
- [12] **Семёнов А.И., Кулаков А.Ю.** Модельно-алгоритмическое обеспечение задач прогнозирования и планирования процесса заготовки кормов. *Изв. вузов. Приборостроение*. 2022. Т.65, №11. С.818-825. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-818-825.
- [13] **Аврамчук Е.Ф., Вавилов А.А., Емельянов С.В.** Технология системного моделирования. Под общ. ред. С.В. Емельянова и др. М.: Машиностроение; Берлин: Техника, 1988. 520 с.
- [14] **Валге А.М., Ерёмин М.А., Сухопаров А.И.** Методика моделирования технологического процесса заготовки кормов из трав. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2018. № 4(97). С.115-126.
- [15] **Победнов Ю.А., Косолапов В.М., Бондарев В.А.** Силосование и сенажирование кормов. М.: Издательство РГАУ-МСХА, 2012. 22 с.
- [16] **Малков Н.Г., Чухина О.В., Демидова А.И., Чечулина В.Д.** Влияние технологических приёмов производства зелёной массы на качество заготовки силоса. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2020. №1(102). С.91-99.
- [17] **Балабанов В.И., Манохина А.А., Шитикова А.В.** Механизация заготовки кормов. Саратов: Амирит, 2022. 84 с.
- [18] **Боргест Н.М., Будаев Д.В., Травин В.В.** Онтология проектирования точного земледелия: состояние вопроса, пути решения. *Онтология проектирования*. 2017. Т.7, №4(26). С.423-442. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-4-423-442.
- [19] **Антонов В.В., Конев К.А.** Интеллектуальный метод поддержки принятия решений в типовой ситуации. *Онтология проектирования*. 2021. Т.11, №1(39). С.126-136. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-126-136.
- [20] **Ермолаев К.А.** Использование онтологии для управления знаниями предприятия. *Исследования по информатике*. 2007. №12. С.65-78.
- [21] **Месарович М., Мако Д, Такахара И.** Теория иерархических многоуровневых систем. М.: Мир. 1973. 344 с.
- [22] **Калинин В.Н., Резников Б.А., Варакин Е.И.** Теория систем и оптимального управления. Часть 2. Понятия, модели, методы и алгоритмы оптимального выбора. М.: Министерство Обороны СССР. 1987. 589 с.
- [23] **Спесивцев А.В.** Нечётко-возможностный подход к формализации и использованию экспертных знаний для оценивания состояний сложных объектов. *Изв. вузов. Приборостроение*. 2020. Т.63, №11. С.985-994. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-11-985-994.

- [24] **Popov V., Spesivtsev A., Sukhoparov A., Spesivtsev V.** Fuzzy-multiple models of formalization of soil resources in formation of system for controlling processes of feed production from grasses // 19th International Scientific Conference Engineering For Rural Development Proceedings, Volume 19/ May 20-22, 2020/ Jelgava, P.773-777. DOI: 10.22616/ERDev.2020.19.TF176.
- [25] **Крылов И.А., Черноусько Ф.Л.** О методе последовательных приближений для решения задач оптимального управления. *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.*, 1962, Т.2, №6. С.1132–1139.

Сведения об авторах

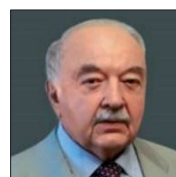
Семёнов Александр Игоревич, 1996 г. рождения. Окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (2020). Аспирант Лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании Санкт-Петербургского Института информатики и автоматизации РАН (СПИИ РАН) СПб ФИЦ РАН. ORCID 0000-0001-7980-042X. alekssemyenov1996@gmail.com. ✉



Борис Владимирович Соколов, 1951 г. рождения. Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, руководитель Лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании СПИИ РАН СПб ФИЦ РАН. ORCID 0000-0002-2295-7570. sokolov_boris@inbox.ru.



Александр Васильевич Спесивцев, 1939 г. рождения. Доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник СПИИ РАН СПб ФИЦ РАН. ORCID 0000-0002-2344-0768. sav2050@gmail.com.



Поступила в редакцию 20.06.2023. после рецензирования 11.03.2025. Принята к публикации 20.03.2025.



Scientific article

DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-198-210

An integrated approach to solving planning problems in forage production

© 2025, A.I. Semyonov ✉, B.V. Sokolov, A.V. Spesivtsev

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPb FRC RAS), St. Petersburg, Russia

Abstract

The article considers an integrated approach to solving the problem of planning the grass harvesting process, which represents the final stage of the forage production process. Automating the solution to grass harvesting planning involves scheduling the operation of agricultural forage harvesting equipment for performing technological operations. This is achieved through the synthesis of fundamentally different mathematical approaches to describing and solving scheduling theory problems under conditions of complex formalization and weak structuring of the research object. The developed approach includes ontological, logical-dynamic and fuzzy-possibility models, along with corresponding methods and algorithms. Ontologies serve as knowledge models representing interconnected processes within the subject area. Logical-dynamic models of operational-scheduling planning describe the constraints and factors present in the grass harvesting process and help determine the most optimal technological approach. Fuzzy-possibility models for strategic planning describe both qualitative and quantitative factors and processes in the considered subject area, allowing for a preliminary estimation of the resources required to solve the problem. The combination of these models provides a formal representation of the subject area, accounts for possible disturbances, and formulates grass harvesting planning as an optimal control task. A prototype decision support system has been developed to assist in planning and executing the grass harvesting process.

Keywords: forage production, ontology, fuzzy-possibility model, logical-dynamic modeling, planning, grass harvesting technology..

For citation: Semyonov AI, Sokolov BV, Spesivtsev AV. An integrated approach to solving planning problems in forage production [In Russian]. *Ontology of designing*. 2025; 15(2): 198-210. DOI: 10.18287/2223-9537-2025-15-2-198-210.

Financing: the study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 24-19-00823, <https://rscf.ru/project/24-19-00823/>. "Development of scientific foundations and intellectual technology for the creation and application of an integrated automated system for proactive monitoring of complex agrobiotechnical objects."

Acknowledgment: The authors express their gratitude to Potryasaev S.A. for developing the software.

Authors' contributions: Semenov A.I. – developed the solution for the operational-scheduling planning problem and authored the original text of the article. Sokolov B.V. – formulated the concept of polymodel description, contributed to the logical-dynamic model of operational-scheduling planning and the ontological model, and performed the final editing of the article. Spesivtsev A.V. – developed the fuzzy-possibility resource model and contributed to the editing of the article. All authors have reviewed and approved the final manuscript.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

List of figures and table

Figure 1 - Technological map of grass harvesting operations for silage

Figure 2 - Ontological representation of grass feed production technology

Figure 3 - Ontological representation of grass silage harvesting process

Figure 4 - Fuzzy scale for the linguistic variable "Vegetation phase"

Figure 5 - Scheduling diagram of the work of the agricultural forage harvesting resources at low intensity of execution of technological operations

Figure 6 - Scheduling diagram of the work of the agricultural forage harvesting resources at high intensity of execution of technological operations

Table 1 – Examples of numerical results for low-intensity and high-intensity scenarios using models (1) and (2)

References

- [1] **Ibragimov AG.** The importance of feed production in the agricultural economy of Russia [In Russian]. *Economics and Entrepreneurship*. 2019. 10(111): 39-41.
- [2] **Kumar S, Singh P, Devi U, Yathish KR, Saujanya PL, Kumar R, Mahanta SK.** An overview of the current fodder scenario and the potential for improving fodder productivity through genetic interventions in India. *Animal Nutrition and Feed Technology* (2023) 23. P. 631-644. DOI: 10.5958/0974-181X.2023.00054.9.
- [3] **Athanasious T. Balafoutis, Frits K. Van Evert, Spyros Fountas.** Smart Farming Technology Trends: Economic and Environmental Effects, Labor Impact, and Adoption Readiness. May 2020. *Agronomy* 10 (5). P. 743.
- [4] **Kataev YuV, Gerasimov VS, Tishaninov IA.** The use of digital technologies in the engineering structure of the agro-industrial complex [In Russian]. Materials of the XIV International Scientific and Practical Internet Conference "Inform-Agro-2022". Moscow, 2022. P.381-387.
- [5] **Skobelev P, Mayorov I, Simonova E, Laryukhin V, Yalovenko O.** Vertical and horizontal negotiations of multi-agent planning services in a multi-service platform for crop management [In Russian]. Proceedings of the XXI International Conference "Problems of Control and Modeling in Complex Systems", Samara, September 03-06, 2019. Samara: OFFORT, 2019. V.2: 46-51.
- [6] **Kalinin VN, Sokolov BV.** Multi-model Approach to the Description of the Air-space Facilities Control Process. *Control Theory and process*, 1995; 1: 149-156.
- [7] **Sokolov BV.** Dynamic models and algorithms for integrated planning of ground-based technical equipment operation with navigation spacecraft [In Russian]. *Trudy SPIIRAN*. 2010; 2(13): 7-44.
- [8] **Kononov AV.** Combinatorial complexity of scheduling jobs with simple linear growth of durations [In Russian]. *Discrete Analysis and Operations Research*. 1996; 3(2): 15–32.
- [9] **Laryukhin V.B.** Methods and means of coupled interaction of autonomous intelligent systems for distributed enterprise resource management [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2023; 13(2): 254-273. DOI:10.18287/2223-9537-2023-13-2-254-273.
- [10] **Skobelev PO, Simonova EV, Budaev DV, Voschuk GYu, Laryukhin VB.** Cloud-based intelligent Smart Farming system for precision farming management [In Russian]. Materials of the conference "Information Technologies in Management (Itu-2018)", St. Petersburg, October 2-4, 2018. - St. Petersburg: Publisher: Concern Central Research Institute Electropribor, 2018. P.261-270.

- [11] **Volhonskaya EE.** The task of optimal assignment of autonomous vehicles in the production and logistics system [In Russian]. *Vestn. Samar. Stat. Tekhn. Un-ta. Ser. Tekhnicheskie nauki.* 2023; 31(2): 20-28.
 - [12] **Semyonov AI, Kulakov AYu.** Model and algorithmic support for forecasting and planning the forage harvesting process [In Russian]. *Journal of Instrument Engineering.* 2022; 65(11): 818-825. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-11-818-825.
 - [13] **Avramchuk EF, Vavilov AA, Yemelyanov SV.** Technology of system modeling [In Russian]. Under the general editorship of S.V. Yemelyanov et al. Moscow: Mashinostroenie; Berlin: Technika, 1988. 520 p.
 - [14] **Valge AM, Eremin MA, Sukhoparov AI.** Methodology for modeling the technological process of procuring feed from grasses [In Russian]. *Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products.* 2018; 4(97): 115-126.
 - [15] **Pobednov YuA, Kosolapov VM, Bondarev VA.** Silage and haylage of forages. Moscow: Publishing House of the Russian State Agrarian University-Moscow Agricultural Academy, 2012. 22 p.
 - [16] **Malkov NG, Chukhina OV, Demidova AI, Chechulina VD.** The influence of technological methods for the production of green mass on the quality of silage [In Russian]. *Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products.* 2020; 1(102): 91-99.
 - [17] **Balabanov VI, Manokhina AA, Shitikova AV.** Mechanization of food preparation: [In Russian]. Saratov: Amirite, 2022. 84 p.
 - [18] **Borgest NM, Budaev DV, Travin VV.** Ontology of precision agriculture design: state of the issue, solution approaches [In Russian]. *Ontology of Designing.* 2017; 7(4): 423-442. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-4-423-442.
 - [19] **Antonov VV, Konev KA.** Intelligent decision support method in a typical situation [In Russian]. *Ontology of designing.* 2021; 11(1): 126-136. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-1-126-136.
 - [20] **Ermolaev KA.** Using ontology for enterprise knowledge management [In Russian]. Research. according to information Kazan: Fatherland. 2007; 12: 65-78.
 - [21] **Mesarovich M, Mako D, Takahara I.** Theory of hierarchical multilevel systems [In Russian]. Moscow: Mir, 1973, 344 p.
 - [22] **Kalinin VN, Reznikov BA, Varakin EI.** Theory of systems and optimal control. Part 2. Concepts, models, methods and algorithms for optimal selection [In Russian]. Moscow: Ministry of Defense of the USSR. 1987. 589 p.
 - [23] **Spesivtsev AV.** A fuzzy-possibility approach to formalizing and using expert knowledge to assess the states of complex objects [In Russian]. *Journal of Instrument Engineering.* 2020; 63(11): 985-994. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-11-985-994.
 - [24] **Popov V, Spesivtsev A, Sukhoparov A, Spesivtsev V.** Fuzzy-multiple models of formalization of soil resources in formation of system for controlling processes of feed production from grasses // 19th International Scientific Conference Engineering For Rural Development Proceedings, Volume 19/ May 20-22, 2020/ Jelgava. P. 773-777. DOI: 10.22616/ERDev.2020.19.TF176.
 - [25] **Krylov IA, Chernousko FL.** On the method of successive approximations for solving optimal control problems [In Russian]. *J. Comput. Mathematics and Mathematical Phys.* 1962; 2(6): 1132-1139.
-

About the authors

Alexander Igorevich Semenov (b. 1996) graduated from the Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation in 2020. Postgraduate student of the Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling of St. Petersburg Institute of Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences. ORCID 0000-0001-7980-042X. alekssemyenov1996@gmail.com. ✉

Boris Vladimirovich Sokolov (born in 1951) - Honored Scientist of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Information Technologies in Systems Analysis and Modeling of the SPII RAS St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; ORCID 0000-0002-2295-7570. sokolov_boris@inbox.ru.

Alexander Vasilyevich Spesivtsev (born in 1939) - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading researcher at the SPII RAS, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences; ORCID 0000-0002-2344-0768. sav2050@gmail.com.

Received June 20, 2023. Revised March 11, 2025. Accepted March 20, 2025.
