

УДК 004.9:504.056
DOI 10.17513/snt.39690

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ РАСТЕНИЕВОДЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИКИ ПАРНИКОВОГО ЭФФЕКТА

Ивашук О.А., Гончаров Д.В., Федоров В.И.

*ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»,
Белгород, e-mail: goncharov_dv@bsu.edu.ru*

В статье рассматриваются основные аспекты реализации адаптивного управления технологией производства растениеводческой продукции в условиях динамики парникового эффекта на основе построения автоматизированных систем, наделённых функциями научно обоснованного зонирования сельскохозяйственных территорий с учетом результатов модельной оценки и прогнозирования рассеяния и накопления парниковых газов. В системах подобного класса встраивается специальный модуль (цифровая платформа), генерирующий и актуализирующий комплекс необходимых моделей, алгоритмов, их программную реализацию, базу знаний для автоматизированного оперативного сравнения и выбора технологической карты и вида культур для их выращивания и обеспечения стабильно высокого урожая в сложившихся/прогнозируемых природно-климатических и техногенных условиях. Эффективное решение поставленных задач и выбор наилучшей технологии из числа альтернативных достигается на основе синтезированного использования методов интеллектуального анализа данных, геоинформационных технологий и 3D-моделирования. Цифровая платформа не только реализует динамическое формирование и использование требуемых прогностических моделей и алгоритмов, но и обеспечивает оперативную реакцию всех компонентов исследуемой автоматизированной системы на текущие изменения в объекте управления и в окружающей среде. Выработываемые в системе адаптационные сценарии управления направлены на повышение продуктивности сельскохозяйственных территорий на основе рационального использования причинно-следственных связей естественного потенциала почвы и растений с климатическими факторами.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, растениеводство, цифровая платформа, моделирование, адаптационные сценарии, динамика парникового эффекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-11-20016) «Разработка и исследование интеллектуальной системы поддержки принятия решений по адаптации сельскохозяйственных территорий в условиях динамики парникового эффекта».

MODELING OF AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR PLANT PRODUCTION IN THE CONDITIONS OF GREENHOUSE EFFECT DYNAMICS

Ivashchuk O.A., Goncharov D.V., Fedorov V.I.

Belgorod State National Research University, Belgorod, e-mail: goncharov_dv@bsu.edu.ru

The article discusses the main aspects of the implementation of adaptive management of crop production technology in the conditions of greenhouse effect dynamics based on the construction of automated systems endowed with the functions of scientifically based zoning of agricultural territories, taking into account the results of model assessment and forecasting of greenhouse gas dispersion and accumulation. In systems of this class, a special module is embedded – a digital platform that generates and updates a set of necessary models, algorithms, their software implementation, a knowledge base for automated operational comparison and selection of the technological map and the type of crops for their cultivation and ensuring a consistently high yield in the prevailing / predicted climatic and man-made conditions. The effective solution of the tasks set and the choice of the best technology from among the alternatives is achieved on the basis of the synthesized use of data mining methods, geoinformation technologies and 3D modeling. The digital platform not only implements the dynamic formation and use of the required predictive models and algorithms, but also provides an operational response of all components of the automated system under study to current changes in the control object and in the environment. The adaptive management scenarios developed in the system are aimed at increasing the productivity of agricultural territories based on the rational use of cause-and-effect relationships of the natural potential of soil and plants with climatic factors.

Keywords: automated control system, crop production, digital platform, modeling, adaptation scenarios, greenhouse effect dynamics

The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-11-20016) “Development and research of an intelligent decision support system for the adaptation of agricultural areas in the context of the dynamics of the greenhouse effect.”

Современные системы мониторинга, прогнозирования и управления территориями и объектами различного уровня и назначения используют средства автоматизации, возможности математического и компьютерного моделирования, интеллектуального анализа данных, что позволяет наделять их как традиционными функциями сбора и обработки информации, так и функциями интеллектуальной поддержки принятия решений. Такие подходы изложены, например, в работах [1] и в предыдущих работах авторов при представлении результатов разработки сложных динамических систем для интеллектуального мониторинга и управления инновационными территориями [2]. При этом в случае последних часто приходится решать социально-экономические задачи, в частности проблемные вопросы обеспечения баланса экономических и социальных интересов общества, проблемные вопросы обеспечения сохранности природной среды и ресурсов, снижения негативного влияния на климат с одновременным обеспечением устойчивого развития техники и технологий [3; 4]. Подобный класс задач может эффективно решаться на основе формирования и комплексной оценки адаптационных сценариев управления в системах исследуемого класса при расширении их возможностей на основе одновременного использования нескольких цифровых технологий (искусственный интеллект, интернет вещей, большие данные) [5].

Так, одной из актуальных и широко обсуждаемых глобальных экологических проблем современного общества является парниковый эффект (ПЭ), влияние которого на состояние окружающей среды усиливается с развитием производственных, сельскохозяйственных технологий, а также с уменьшением площадей лесных массивов. Главным фактором, влияющим на динамику ПЭ, является концентрация в атмосфере парниковых газов (ПГ), прежде всего углекислого газа (CO_2), задерживающих тепловое излучение и способствующих климатическим изменениям: повышение температуры, разрушение озонового слоя и т.п. При этом ряд исследований показал, что при повышении концентрации основного парникового газа CO_2 в атмосфере был обнаружен положительный эффект относительно урожайности сельскохозяйственных культур [2; 3; 6]: в среднем для всех видов рост урожайности составил 26%, прирост сухого вещества молодых растений – 40%.

В последние годы увеличилось число научных исследований в направлении таких задач, как расчет и прогнозирование концентраций парниковых газов как от тех-

ногенных, так и от природных источников [7–10], а также моделирование изменений климата [11]. Часть из них может быть составляющей общего методологического инструментария для обеспечения эффективного управления урожайностью сельскохозяйственных культур с учетом динамики парникового эффекта (ПЭ). Однако на сегодняшний момент нет методов и алгоритмов, позволяющих как количественно, так и пространственно оценивать и прогнозировать уровень выброса парниковых газов, а также формировать адаптационные сценарии, определяющие наиболее результативные с точки зрения урожайности условия посева сельскохозяйственных культур. Такие сценарии крайне важны для научного обоснования расположения территории и площади посевов, выбора специфики самой культуры, оценки ожидаемого эффекта.

Авторским коллективом предлагается разработка автоматизированной системы по управлению производством растениеводческой продукции в условиях динамики ПЭ, функционирование которой обеспечит определение оптимальных параметров природно-сельскохозяйственного и агроэкологического зонирования исследуемых территорий, их качественную и количественную структуру, формирование адаптационных сценариев управления [2].

Развитие и рост сельскохозяйственных растений основан на процессе фотосинтеза: листья растений поглощают углекислый газ из приземного слоя атмосферы и вместе с водой преобразуют ее в органические вещества, необходимые для роста растений. Исходя из вышесказанного, недостаток CO_2 становится одним из основных факторов, ограничивающих рост, развитие и урожайность растений. Данная проблема может быть успешно решена при выявлении территорий с необходимыми значениями концентрации CO_2 для посевов сельскохозяйственных культур определенного вида в зависимости от динамики ПЭ [11]. Следует отметить, что в данном случае появляется возможность также управления гумусовым слоем почвы, который влияет на ее плодородие и урожайность.

Разработка адаптационных сценариев и научное обоснование зонирования сельскохозяйственных территорий с учетом динамики ПЭ связаны со сбором и обработкой значительных объемов множественных и разнородных данных, одновременным учетом контролируемых параметров, отличающихся значительной распределенностью по большой площади и случайным характером их природы, участия в производственных процессах живых организмов

[12]. Все это определяет необходимость использования возможностей цифровых технологий Индустрии 4.0 [13; 14].

Материал и методы исследования

Как указано выше, сегодня фрагментарно решены задачи моделирования климатических изменений, рассеивания и накопления газов, зонирования и т.д., результаты которых возможно использовать при организации процесса растениеводства [7; 8]. Однако в целом сохранился традиционный подход к управлению урожайностью.

Авторским коллективом построены и исследованы функциональные и структурные модели автоматизированной системы по управлению производством растениеводческой продукции в условиях динамики ПЭ, которая обеспечит научно обоснованное управление зонированием сельскохозяйственных территорий в целях повышения урожайности согласно представленной схеме на рисунке 1. На схеме показано, что в отличие от традиционного подхода введены такие механизмы для реализации процесса управления, как математические, имитационные, ситуационные модели, соответствующее программное обеспечение (ПО): оценка существующего и прогнозного значения концентрации парниковых газов в приземном слое атмосферы, пространственно-временной анализ (плоскость и 3D) их рассеивания и накопления, выявление причинно-следственных связей между параметрами биотехносферы; модели адаптационных сценариев.

При декомпозиции основных функций системы введен блок интеллектуальной поддержки принятия решений, который использует в автоматическом режиме результаты мониторинга и моделирования.

Соответствующая структурная модель автоматизированной системы по управлению производством растениеводческой продукции в условиях динамики ПЭ схематично показана на рисунке 2.

Результаты исследования и их обсуждение

Результативность работы конкретной автоматизированной системы по управлению производством растениеводческой продукции неотъемлемо связана со спецификой данных объектов и процессов, особенностью инфраструктуры территории и другими параметрами внешней среды. Это требует использования набора различных технических и цифровых решений. Для этого введена специализированная цифровая платформа, с которой постоянно взаимодействуют все составляющие интеллектуальной системы поддержки принятия решений (ИСППР). Она позволяет автоматизированно определять необходимые компоненты множеств моделей (ГИС-моделей, методов, технических и цифровых решений) и формировать единый проект, необходимый для принятия научно обоснованных решений [10]. В ее структуре содержатся соответствующие базы данных и правил, инструментарий для оперативного моделирования и комплектования.



Рис. 1. Контекстная диаграмма процесса управления производством растениеводческой продукции в условиях динамики ПЭ (как будет)



Рис. 2. Обобщенная модель автоматизированной системы управления производством растениеводческой продукции в условиях динамики ПЭ

Система рассматриваемого класса наделена специальными функциями, определяющими комплексность предлагаемого подхода, реализуемыми интеллектуальными подсистемами:

- сбор и обработка информации о количественном и качественном составе выбросов вредных веществ в атмосферный воздух исследуемой территории, определяющих формирование парникового эффекта, предварительный интеллектуальный анализ (подсистема интеллектуального мониторинга ИСППР);

- формирование комплекса математических и ситуационных моделей для оценки различного уровня текущей и прогнозной ситуации по состоянию биотехносферы и уровню влияния ПЭ на исследуемой территории (подсистема моделирования в ИСППР);

- пространственно-временной анализ с учётом погодных условий с выявлением и определением качественных и количественных характеристик зон скопления парниковых газов (подсистема интеллектуального исследования данных ИСППР);

- оценка и прогнозирование состояния биотехносферы и уровня влияния ПЭ на исследуемой территории (подсистема

интеллектуального исследования данных ИСППР);

- формирование адаптационных сценариев, определяющих оптимальные с точки зрения урожайности условия посева сельскохозяйственных культур (расположение территории, площади посевов, специфика самой культуры, ожидаемый эффект) с учётом пространственно-временной структуры зон скопления парниковых газов;

- определение оптимальных параметров и территории посадки растений, которые можно рассматривать как составляющие карбоновых ферм и плантаций (подсистема формирования сценариев управления интеллектуальной системой поддержки принятия решений);

- эколого-экономическая оценка выбранных для реализации адаптационных сценариев (подсистема формирования сценариев управления ИСППР).

Результативность работы конкретной ИСППР, включающей исследование различных объектов и процессов, функционирующих на определённой территории, неотъемлемо связана с их спецификой, особенностью инфраструктуры территории и другими параметрами внешней среды.

*Моделирование объекта
автоматизированного управления*

Процесс производства растениеводческой продукции в условиях динамики ПЭ при внедрении исследуемой автоматизированной системы становится объектом автоматизированного управления как система состояний природных, растениеводческих и техногенных объектов в их взаимосвязи, влияющих на урожайность сельскохозяйственных культур. С точки зрения теоретико-множественного подхода систему данного класса A_{oy} представим формулой:

$$A_{oy} = \langle S_{oy}, Q, X, F_{oy}, V_{oy} \rangle, \quad (1)$$

где $S_{oy} = \{s_{oy}\}$ – множество элементов объекта управления, $s_{oy} = \{s_{cy}, s_{cp}, s_{cc}\}$, где s_{cy} – природная подсистема, s_{cp} – подсистема растениеводства, s_{cc} – подсистема секвестрации CO_2 ; Q – внешнее воздействие на множество S_{oy} : $Q = \{U, \omega\}$, где U – управляющие воздействия и ω – внешние воздействия (метеорологические, природно-климатические и др.); $X = \{L, Z\}$ – множество параметров, которые описывают состояния элементов в S_{oy} : L – количество, характеризующее объем (количество продукции с единицы площади) и качество собранного урожая (концентрация питательных элементов); $Z = \{Z_{cp}, Z_{cc}\}$, где Z_{cp} – множество состояний сельскохозяйственных территорий: технологические и технические параметры, объемы потребляемых ресурсов и выбросов CO_2 в процессе производства растениеводческой продукции; Z_{cc} – множество со-

стояний сельскохозяйственных территорий: технологические и технические параметры, объем поглощенного и выброшенного в атмосферу CO_2 в процессе подготовки с/х территорий; $F_{oy} = \{f_{oy}\}$ – множество отображений на S_{oy}, Q, X ; $F_{oy}: (S_{oy}, Q, X) \rightarrow X$; $V_{oy} = \{v_{oy}\}$ – множество отношений над элементами S_{oy}, Q, X ; $V_{oy}: (S_{oy}, Q, X)$.

Основные отображения осуществляют компоненты S_{oy} :

$$f_x: Z_{cp} * Z_{cc} * \omega \rightarrow X \text{ – компонент } s_{cy}$$

$$f_{cp}: x_{cp} * z_{cp} * \omega * U_{cp} \rightarrow Z_{cp} \text{ – компонент } s_{cp}$$

$$f_{cc}: x_{cc} * z_{cc} * \omega * U_{cc} \rightarrow Z_{cc} \text{ – компонент } s_{cc}$$

Таким образом $f_{oy} = \{f_x, f_{cp}, f_{cc}\}$ – множество, включающее полный спектр причинно-следственных связей, которые необходимы для прогнозирования и моделирования наиболее выгодных условий для выращивания сельскохозяйственных культур в условиях динамики ПЭ.

На рисунке 3 объект автоматизированного управления A_{oy} представлен схематично.

Для проведения оценок при реализации приведенных выше отображений f_x , а именно для прогнозирования концентрации парниковых газов в приземном слое атмосферы сельскохозяйственных территорий и оценки влияния ПЭ на урожайность растений, была разработана модель в виде искусственной нейронной сети (ИНС). Нейросетевое моделирование ранее применялось авторами при решении схожих задач – прогнозирования состояния природных и природно-технических объектов (например, [3]).



Рис. 3. Объект автоматизированного управления процессом производства растениеводческой продукции в условиях динамики ПЭ

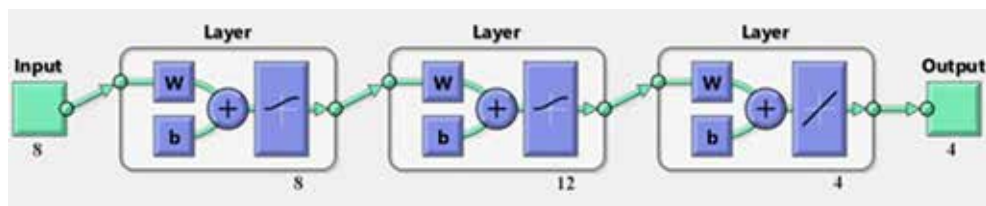


Рис. 4. Структура полученного многослойного персептрона, реализованная в системе MATLAB

В качестве входных параметров модели (составляющее множество Z) были выбраны показатели, характеризующие выбросы объектов производства: объемный расход выбросов ($\text{м}^3/\text{ч}$); температура выбросов и ее возможные колебания ($^{\circ}\text{C}$); плотность газа (кПа); скорость газа ($\text{м}/\text{с}$); а также составляющие множества ω : скорость и направление ветра ($\text{м}/\text{с}$); расстояние от точки выброса до сельскохозяйственной территории (м). Выходными параметрами модели (составляющие множества X) были определены концентрации различных газообразных загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы сельскохозяйственной территории ($\text{мг}/\text{м}^3$): углекислый газ (CO_2), метан (CH_4), озон (O_3), оксид азота (N_2O) [5].

Для получения обучающей выборки было проведено взятие проб воздуха на сельскохозяйственных территориях, находящихся в зоне влияния различных производственных предприятий Белгородской области (всего 200 проб в трехкратном повторении на каждом участке). Результаты данных исследований были разделены на обучающую (по 150 пробам) и тестовую (проверочную, по 50 пробам) выборки [6].

В ходе построения ИНС и осуществления экспериментов использовался пакет прикладных программ и функций Neural Network Toolbox системы MATLAB, позволяющий реализовать ИНС различных топологий [1; 2]. По результатам тестовых экспериментов лучшие результаты показала сеть с топологией многослойного персептрона с 2 скрытыми слоями и сигмовидными функциями активации. Для данной модели среднеквадратичная ошибка обучения составила $0,2 \cdot 10^{-5}$; коэффициент детерминации 99,5; средние ошибки аппроксимации на обучающей и тестовой выборках 0,98% и 3,95% соответственно. Структура данной сети представлена на рисунке 4.

Заключение

Представленные результаты связаны с модернизацией традиционного подхода управления производством растениеводческой продукции с целью повышения урожайности сельскохозяйственных культур.

Это требует принципиального изменения в системе управления растениеводческим производством с учетом адаптации территорий к условиям динамики ПЭ с использованием цифровых технологий и внедрения специализированной автоматизированной системы управления.

Построена и протестирована модель ИНС, которая позволяет проводить имитационные эксперименты по оценке и прогнозированию концентрации ПГ в приземном слое атмосферы сельскохозяйственных территорий; для формирования обучающей выборки и проверки адекватности модели были проведены натурные эксперименты, получено 200 проб воздуха в зоне действия производственного сектора с лабораторным определением концентрации парниковых газов.

Объект автоматизированного управления с предлагаемой структурой может быть использован как составляющая интеллектуальной сети управления сельскохозяйственными территориями. Результаты ее работы, прежде всего, необходимы для обеспечения стабильного увеличения урожайности, развития и восстановления территорий и обеспечения продовольственной безопасности в условиях динамики природно-климатических и техногенных параметров.

Список литературы

1. Иващук О.А., Федоров В.И., Гончаров Д.В. Разработка метода и алгоритма оценки сельскохозяйственных территорий в условиях динамики парникового эффекта // Инновационные технологии в науке и образовании (с. Дивноморское, 26 сентября 2022 г.). Ростов н/Д.: ООО «ДГТУ-ПРИНТ», 2022. С. 232-236.
2. Иващук О.А., Гончаров Д.В., Федоров В.И., Гурьянова О.И. Метод комплексной оценки состояния сельскохозяйственных территорий в условиях динамики парникового эффекта на основе технологии искусственного интеллекта // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 2. С. 59-65.
3. Иващук О.А., Кузичкин О.Р., Гончаров Д.В., Дунаева В.А. Цифровые технологии для оценки и прогнозирования влияния пространственно-временного распределения парниковых газов на фотосинтетическую активность сельскохозяйственных культур // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023. Т. 27, № 1. С. 38-56.
4. Квинин Д.А. Подходы к управлению экологической безопасностью дворовых территорий // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. 2014. Т. 1, № 6. С. 62-66.

5. Волкова С.Н. Метод имитационного моделирования экологического прогнозирования // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 9. С. 171-174.
6. Кособрюхов А.А. Активность фотосинтетического аппарата при периодическом повышении концентрации CO₂ // Физиология растений. 2009. Т. 56, № 1. С. 8-16.
7. Сухановский Ю.П. Математическое моделирование динамики запасов гумуса в черноземе: прогноз и выводы // Достижения науки и техники АПК. 2009. № 1. С. 13-15.
8. Гончаров Д.В., Свиридова И.В. Методы и алгоритмы подбора выгодного местоположения предприятия на основе нейро- нечеткого анализа // Высшая школа: научные исследования: материалы Межвузовского международного конгресса (г. Москва, 23 июня 2022 г.). М.: Инфинити, 2022. С. 108-113.
9. Шичкин А.В. Искусственные нейронные сети для прогнозирования изменения приземных концентраций основных парниковых газов // Экологические системы и приборы. 2021. № 9. С. 10-18.
10. Тасболат Б., Зулпанов Ш.М. Районирование земель сельскохозяйственного назначения по использованию // Геология, география и глобальная энергия. 2011. № 2. С. 284-287.
11. Быкова А.В. Влияние изменения климата на сельское хозяйство // Естественные и математические науки в современном мире. 2014. № 14. С. 114-121.
12. Кудяров В.Н. Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1049-1049.
13. Мариев О.С., Давидсон Н.Б., Емельянова О.С. Влияние урбанизации на выбросы углекислого газа в регионах России // Journal of Applied Economic Research. 2020. Т. 19, № 3. С. 286-309.
14. Ильинова А.А., Ромашева Н.В., Стройков Г.А. Перспективы и общественные эффекты проектов секвестрации и использования углекислого газа // Записки Горного института. 2020. Т. 244. С. 493-502.