



Научная статья

УДК 631.171

doi: 10.55186/25876740_2024_67_2_201

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДУКЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ ФИТОАГРОЦЕНОЗОВ В УСЛОВИЯХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИБРИДНЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ И АЛГОРИТМОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Н.И. Лебедь, К.Е. Токарев, Д.Д. Нехорошев, С.Ю. Сторожаков, А.Ю. Попов

Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград, Россия

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования технологий повышения продуктивности в рамках программируемого получения урожая в условиях точного земледелия с использованием специализированных аппаратно-программных комплексов, базирующихся на алгоритмах искусственного интеллекта, позволяющих обеспечить стабильное повышение урожайности с учетом строгого соблюдения экологических норм и ограничений, сохранение агроландшафтов и почвенного плодородия. В ходе работы авторами предложен алгоритм управления продукционными процессами возделывания фитоагроценозов, адаптированный под условия точного земледелия Волгоградской области, учитывающий характеристики агроландшафта, состав почвенного покрова участка, климатические факторы и т.д., что необходимо для точного и адекватного описания моделей сельскохозяйственных объектов при разработке гибридных автоматизированных систем в рамках программируемого возделывания сельскохозяйственных культур. Реализована модель управления опытного участка в условиях закрытых агроэкосистем, включающая три уровня: нижний (датчики, исполнительные органы), средний (ПЛК/МК), верхний (человеко-машинный интерфейс). Связь между средним и верхним уровнями представлена протоколом Modbus RTU, реализованного по Bluetooth-радиосвязи. Предлагается гибридная автоматизированная система управления (ГАСУ) неоднородным сельскохозяйственным объектом, где контроль частью параметров (температура, влажность воздуха, полив и т.д.) возможно реализовать неадаптивными и адаптивными методами, а состояние растений, профилактику и определение болезней — с использованием алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения, в том числе нейронными сетями. Полученные в ходе исследования результаты могут быть использованы для совершенствования отечественных технологий обеспечения устойчивости аграрного производства и снижения уровня импортозависимости в рамках комплексного решения задач социально-экономического развития регионов.

Ключевые слова: фитоагроценозы, продукционный процесс, точное земледелие, гибридные автоматизированные системы, алгоритмы искусственного интеллекта

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-20041, <https://rscf.ru/project/22-21-20041/> и Волгоградской области.

Original article

DEVELOPMENT OF METHODS FOR MANAGING THE PRODUCTION PROCESSES OF PHYTO-AGROCENOSES IN PRECISION FARMING USING HYBRID AUTOMATED SYSTEMS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE ALGORITHMS

N.I. Lebed, K.E. Tokarev, D.D. Nekhoroshev, S.Yu. Storozhakov, A.Yu. Popov

Volograd State Agricultural University, Volgograd, Russia

Abstract. The relevance of the study is due to the need to improve productivity enhancement technologies within the framework of programmed harvesting in precision farming using specialized hardware and software systems based on artificial intelligence algorithms that allow for a stable increase in yield, taking into account strict compliance with environmental standards and restrictions, preservation of agricultural landscapes and soil fertility. In the course of the work, the authors proposed an algorithm for managing the production processes of phytoagrocenosis cultivation, adapted to the conditions of precision agriculture in the Volgograd region, taking into account the characteristics of the agricultural landscape, the composition of the soil cover of the site, climatic factors, etc., which is necessary for an accurate and adequate description of models of agricultural objects in the development of hybrid automated systems within the framework of programmed cultivation of agricultural crops. A control model of the pilot site in closed agroecosystems has been implemented, including three levels: lower (sensors, executive bodies), middle (PLC/MC), upper (human-machine interface). The communication between the middle and upper levels is represented by the Modbus RTU protocol implemented via Bluetooth radio communication. A hybrid automated control system (GASU) for a heterogeneous agricultural object is proposed, where the control of some parameters (temperature, humidity, irrigation, etc.) can be implemented by non-adaptive and adaptive methods, and the condition of plants, prevention and determination of diseases — using artificial intelligence and machine learning algorithms, including neural networks. The results obtained in the course of the study can be used to improve domestic technologies to ensure the sustainability of agricultural production and reduce the level of import dependence in the framework of a comprehensive solution to the problems of socio-economic development of regions.

Keywords: phytoagrocenoses, production process, precision agriculture, hybrid automated systems, artificial intelligence algorithms

Acknowledgments: the research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-21-20041, <https://rscf.ru/project/22-21-20041/> and the Volgograd region.

Введение. Стабильное и успешное развитие всех отраслей современного сельского хозяйства России, обеспечивающих продовольственную безопасность государства, зависит от многих факторов, в том числе от процессов автоматизации производства, организации и управления, контроля, прогнозирования продуктивности и т.д. Автоматизация сельскохозяйственного производства дает возможность получения более устойчивых показателей и снижения затрат, связанных с ним,

планирования и регулирования стоимости продукции в рамках сложившейся рыночной картины конкретного региона, в том числе Волгоградской области. Промышленный характер сельскохозяйственного производства требует создания новых методов его интенсификации, среди которых важное место занимают интеллектуальные технологии мониторинга и оценки состояния посевов на значительных площадях с использованием средств дистанционного мониторинга [1].

Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования технологий повышения продуктивности в рамках программируемого получения урожая в условиях точного земледелия с использованием специализированных аппаратно-программных комплексов, базирующихся на алгоритмах искусственного интеллекта, что позволит обеспечить стабильное повышение урожайности с учетом строгого соблюдения экологических норм и ограничений, сохранение агроландшафтов



и почвенного плодородия. С учетом современных требований к качеству технологических процессов в растениеводстве в условиях непостоянства параметров сельскохозяйственного объекта и действия возмущений применение традиционных ПИД-регуляторов с реализацией на программируемых логических контроллерах (ПЛК) и микроконтроллерах становится недостаточным. Адаптивные системы возникают в связи с усложнением решаемых задач, отсутствием практической возможности подробного изучения процессов в управляемых объектах, а также сложностью построения математических моделей в связи с большим количеством переменных, воздействующих на критерии оптимизации, взаимовлияния переменных друг относительно друга, многокритериальностью процесса оптимизации. Примерами таких объектов могут быть: агробиоценозы, закрытые искусственные экосистемы, поведение сельскохозяйственных животных в условиях индивидуального и группового содержания. В вышеуказанных случаях априорные данные о характеристиках или уравнениях, описывающих все реакции, получить невозможно, слишком широкий разброс параметров. Неадаптивные методы управления предусматривают наличие достаточного объема априорных сведений о внутренних и внешних условиях работы на предварительной стадии. Эффект приспособляемости к изменениям условий внешней среды в адаптивных системах достигается за счет того, что часть функций по получению, обработке и анализу недостающей информации об управляющем процессе осуществляется не на предварительной стадии, а самой системой в процессе работы [2-4].

Адаптивные системы, разработанные согласно традиционным принципам, имеют недостатки. Большинство алгоритмов адаптации получены при условии отсутствия неконтролируемых возмущающих воздействий и возможности определить все параметры объекта управления в процессе идентификации. Регуляторы, построенные по классическому принципу, не всегда позволяют осуществлять управление, обладающее свойством робастности, то есть нечувствительностью к случайным, нехарактерным возмущающим воздействиям. Данное обстоятельство провоцирует использование для объектов АПК, чьи технологические процессы моделируются значительным количеством переменных с широким разбросом значений, а также многокритериальность оптимизации параметров и режимов системы, интеллектуальных систем управления [5].

В традиционном исполнении адаптивные системы управления строятся на использовании ПЛК с поддержкой операционной системы (ОС) Linux, позволяя решать задачи адаптации к изменяющимся параметрам объекта. Построение и дальнейшая эксплуатация интеллектуальных систем управления базируется на встраивании в процесс автоматизированного регулирования ряда информационных технологий, в частности искусственных нейронных сетей. Однако реализация интеллектуальных систем управления в промышленности достигается, как правило, средствами нечеткой логики, в частности, аппаратной реализацией нечеткого микроконтроллера или программно-аппаратной (применение нечетких специализированных библиотек для микроконтроллеров общего назначения (AVR, PIC, ARM, MSP) и др.). Это требует разработки специализированных программных

комплексов интеллектуального управления процессами достижения продуктивности агроценозов с использованием искусственных нейронных сетей под конкретные задачи, что является актуальным в условиях обеспечения продовольственной безопасности страны [2]. Целью исследования является разработка научно обоснованных рекомендаций по повышению почвенного плодородия и продуктивности полевого севооборота в условиях точного земледелия Волгоградской области с использованием гибридных автоматизированных систем и алгоритмов искусственного интеллекта.

Материалы и методы. Программирование логистических контроллеров и микроконтроллеров осуществлялось с помощью интегрированной среды разработки на языках FBD и C++. Для связи между компонентами программно-аппаратного комплекса была выбрана модель «master/slave». Связь между средним («slave» — ПЛК/МК) и высшим («master» — ЭВМ) уровнями автоматизации осуществлялась посредством коммуникационного протокола Modbus RTU с помощью последовательных линий связи RS-485 через OPC-сервера. Для обеспечения человеко-машинного интерфейса с системой управления и взаимодействия с контроллерами применялись SCADA-системы [6, 7] для ста-

ционного (Simp Light) и удаленного управления с мобильного устройства (KaScada Smart Craft). Интеллектуализация системы управления достигалась применением нейронных сетей глубокого обучения со сверточными слоями (СНС) [8-11, 16] веб-сервиса «Google Teachable Machine» для классификации полученных изображений с web-, ip-камеры в режиме реального времени. Выполнение задач поддержки и принятия решений интеллектуальной системой, а также для взаимодействия СНС и системы управления осуществлялось посредством сценарного программирования, разработка скриптов была выполнена на языках программирования C++ и ChaiScript.

Результаты. Для разработки научно обоснованных рекомендаций при принятии управленческих решений по повышению почвенного плодородия и продуктивности полевого севооборота в опытно-экспериментальных условиях точного земледелия Волгоградской области был реализован алгоритм выбора методов управления, адаптированный под условия сельскохозяйственного производства (рис. 1).

По этому алгоритму необходимыми этапами являлись: выбор сельскохозяйственного объекта для управления с дальнейшим его изучением и моделированием (физическим, математическим, имитационным и др.). Как правило, при многофакторном моделировании производят выбор критериев оптимизации в качестве оценки эффективности работы управляемой системы. После подбора таких критериев определяют факторы, оказывающие существенное влияние на управляемый процесс, число которых варьируется в зависимости от того, насколько адекватной будет являться математическая модель. Кроме этого, каждый фактор характеризуется уровнем варьирования, что еще также сказывается на сложности описания процесса математически. Также существенное влияние оказывает взаимовлияние факторов друг на друга при их групповой оценке на критерии оптимизации.

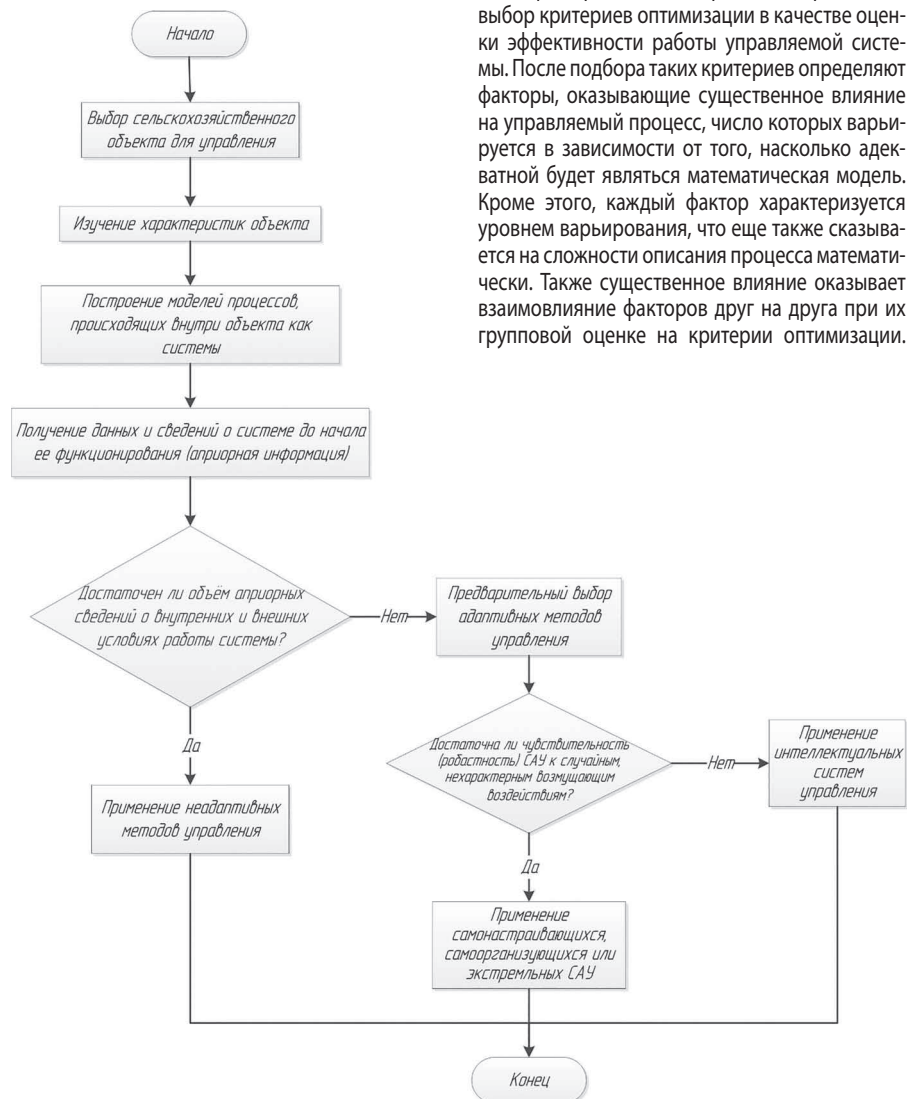


Рисунок 1. Алгоритм выбора методов управления для объектов растениеводства
Figure 1. Algorithm for selecting management methods for crop production objects

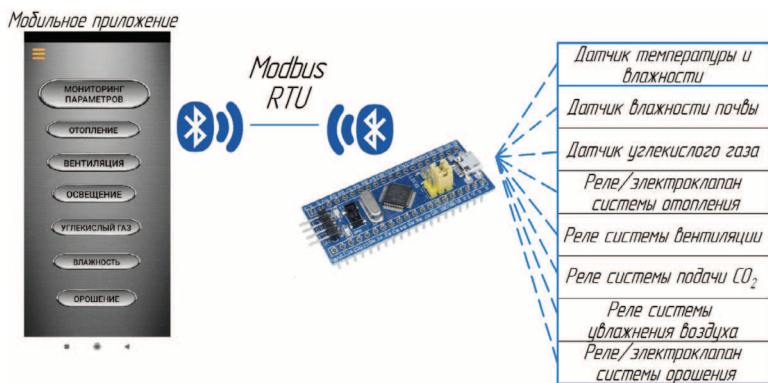


Рисунок 2. Модель управления опытного участка в условиях закрытой агроэко системы
Figure 2. Management model of a pilot site in a closed agroecosystem

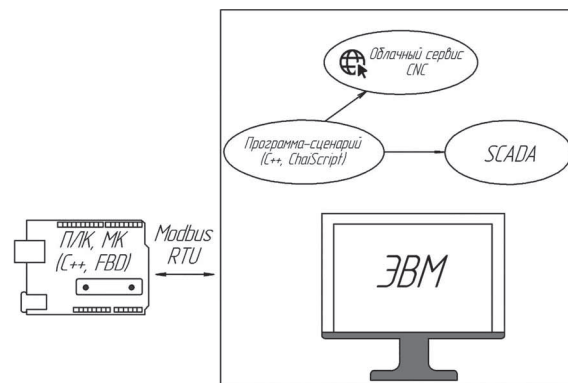


Рисунок 3. Модель управления неоднородным сельскохозяйственным объектом
Figure 3. Model for managing heterogeneous agricultural object

Примерами для такого подхода при выборе методов управления в АПК могут являться сельскохозяйственные объекты растениеводства — агробиоценозы, в частности функционирующие внутри закрытых агроэкосистем: теплицы, климатические камеры и др.

При изучении характеристик и построении моделей таких объектов и биологических систем априорные данные для управления классическими методами получить невозможно, ввиду значительного количества факторов: климатические (яркость, спектр освещения; световой день; продолжительность и интенсивность вентиляции; состав регулируемой газовой среды; температурные режимы и др.), человеческие (организация рабочего процесса; квалификация персонала и др.), технические (уровень автоматизации и механизации, условия эксплуатации оборудования и др.). Следует отметить, что моделирование индивидуальных объектов (опытный участок, делянка и др.) позволяет собрать достаточный объем априорных данных, позволяя использовать неадаптивные методы управления. Для остальных случаев по алгоритму предварительно выбираются адаптивные методы управления. Дальнейший выбор по веткам алгоритма будет зависеть от однородности сельскохозяйственного объекта, выражающим в классическом понимании теории автоматического управления понятие «робастность» [12]. Под однородностью в данном случае растениеводства понимается, в частности, единообразие почвенного покрова участка, занимаемого растениями, а также характеристик объекта, что необходимо для точного и адекватного описания модели сельскохозяйственного объекта. Единообразие достигается проведением операций и мероприятий машинами и аппаратами при культивировании растений. Достаточное достижение единообразия позволит применить адаптивные методы управления объектом, недостаточное — вынуждает применять методы интеллектуализации.

На рисунке 2 представлена разработанная модель управления опытным участком в условиях закрытой агроэко системы (рис. 2).

Система управления выполнена тремя уровнями: нижним (датчики, исполнительные органы), средним (ПЛК/МК), верхним (человеко-машинный интерфейс). Связь между средним и верхним уровнями представлена протоколом Modbus RTU, реализованного по Bluetooth-радиосвязи. Для приема-передачи

данных контроллером (ПК/МК) использован Bluetooth Module HC-06, подключенный по UART-интерфейсу. Такая система автоматизированного управления позволяет производить оперативный мониторинг показателей объекта, строить непрерывные зависимости, управлять параметрами через исполнительные механизмы, вести журнал штатных и нештатных режимов работы, аварийных ситуаций. Управление таким сельскохозяйственным объектом (искусственная агроэко система, в качестве примера — опытный участок теплицы) можно реализовать неадаптивными ГСУ посредством ПИД-регуляторов. Нами предлагается ГСУ неоднородным сельскохозяйственным объектом (рис. 3), чье поведение характеризуется недостаточным объемом априорной информации при низкой чувствительности к случайным нехарактерным возмущающим воздействиям [13, 14]. При этом управление частью параметров (температура, влажность воздуха; полив) возможно реализовать неадаптивными и адаптивными методами, а состояние растений, профилактику и определение болезней — посредством интеллектуальных ГСУ-инструментами нейронных сетей глубокого обучения со сверточными слоями с использованием веб-сервиса машинного обучения «Google Teachable Machine».

Взаимодействие компонентов программно-аппаратного комплекса: SCADA-системы и веб-сервиса, выполнение задач поддержки и принятия решений осуществляется программой-скриптом по заданному алгоритму: обнаружение изменения цвета частей растений от эталонного цвета (регистрация изменения посредством технического зрения) — фиксирование факта изменения цвета программой-скриптом — действия программы-скрипта в интерфейсе SCADA-системы (включение оповещения, удаление зараженного участка и т.д.) [15].

Выводы. В ходе исследования проблем применения методов и алгоритмов управления производственными процессами возделывания сельскохозяйственных культур методами гибридных систем управления и искусственного интеллекта в условиях точного земледелия Волгоградской области авторами:

- разработан алгоритм выбора методов управления (неадаптивные, адаптивные, интеллектуальные), адаптированный под условия сельскохозяйственного производства, учитывающий состав почвенного покрова

участка, занимаемого растениями, что необходимо для точного и адекватного описания модели сельскохозяйственного объекта при последующей разработке ГСУ;

- предложена модель управления опытного участка в условиях закрытой агроэко системы, включающая три уровня: нижний (датчики, исполнительные органы), средний (ПЛК/МК), верхний (человеко-машинный интерфейс). Связь между средним и верхним уровнями представлена протоколом Modbus RTU, реализованного по Bluetooth-радиосвязи. Модель реализует неадаптивные и адаптивные методы управления;
 - разработана ГСУ неоднородным сельскохозяйственным объектом, где управление частью параметров (температура, влажность воздуха; полив) возможно реализовать неадаптивными и адаптивными методами, а состояние растений, профилактику и определение болезней — посредством компьютерного модуля на базе СНС.
- Полученные в ходе исследования результаты могут быть использованы для совершенствования отечественных технологий обеспечения устойчивости аграрного производства и снижения уровня импортозависимости в рамках комплексного решения задач социально-экономического развития регионов

Список источников

1. Корнев С.М., Басуматорова Е.А. Механизация и автоматизация процессов в растениеводстве // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2022. № 1 (93). С. 131-134.
2. Староверов Б.А., Олоничев В.В., Смирнов М.А. Цифровой адаптивный регулятор для промышленного контроллера с многозадачной POSIX-совместимой операционной системой // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2011. № 3. С. 37-39.
3. Михайленко И.М. и др. Управление агротехнологиями и роботизированные средства реализации // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. № 1 (30). С. 242-258.
4. Зыков А.В., Юнин В.А., Захаров А.М. Использование робототехнических средств в АПК // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 3 (81). С. 8-11. doi: 10.23670/IRJ.2019.81.3.001
5. Хвостенко Т.М., Алексанов И.А. Внедрение и проблематика робототехнических средств в АПК // Вестник образовательного консорциума Среднерусский университет. Серия: Информационные технологии. 2022. № 2 (20). С. 4-9.
6. Лепешко Л.С. Обзор программных продуктов для автоматизации в АПК // Новости науки в АПК. 2019. № 3 (12). С. 318-324. doi: 10.25930/2218-855X/082.3.12.2019





7. Будников Д.А. Разработка SCADA-системы контроля лабораторного оборудования и параметров процесса сушки зерна // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. № 2 (31). С. 230-237.
8. Tokarev, K. et al. (2023). Monitoring and Intelligent Management of Agrophytocenosis Productivity Based on Deep Neural Network Algorithms. In: Vasant, P., Weber, G.W., Marmolejo-Saucedo, J.A., Munapo, E., Thomas, J.J. (eds) Intelligent Computing & Optimization. *ICO 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 569. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-031-19958-5_65
9. Токарев К.Е., Руденко А.Ю., Кузьмин В.А., Чернявский А.Н. Теория и цифровые технологии интеллектуальной поддержки принятия решений для увеличения биопродуктивности агроэко систем на основе нейросетевых моделей // Известия Нижегородского агроуниверситетского комплекса. 2021. № 4 (64). С. 421-440. doi: 10.32786/2071-9485-2021-04-42
10. Токарев К.Е., Лебедь Н.И., Кузьмин В.А., Чернявский А.Н. Теория и технологии управления орошением сельскохозяйственных культур на основе информационных технологий поддержки принятия решений и математического моделирования // Известия Нижегородского агроуниверситетского комплекса. 2020. № 4 (60). С. 433-448. doi: 10.32786/2071-9485-2020-04-41
11. Лебедь Н.И., Токарев К.Е. Повышение продуктивности агрофитоценозов в условиях точного земледелия с использованием нейросетевых алгоритмов глубокого обучения: обоснование применения и аспекты компьютерной реализации // Международный сельскохозяйственный журнал. 2022. № 6 (390). С. 662-664. doi: 10.55186/25876740_2022_65_6_662
12. Дубенок Н.Н., Бородых В.В., Лытов М.Н. Алгоритм учета пространственной неоднородности исходных характеристик орошаемого участка на основе ГИС-технологий // Российская сельскохозяйственная наука. 2019. № 1. С. 66-70.
13. Bereznoi, V.A., Ivashchuk, O.A., Maslakov, Y.N. (2020). Approaches for Automated Monitoring and Evaluation of In Vitro Plant's Morphometric Parameters. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, vol. 17, no. 9-10, pp. 4725-4732. doi: 10.1166/jctn.2020.9368
14. Бережной В.В., Иващук О.А., Семенов Д.С. Обзор методов и алгоритмов автоматизированных систем фенотипирования растений // Современные наукоемкие технологии. 2021. № 4. С. 111-116. doi: 10.17513/snt.38624
15. Игнатьев В.В. Адаптивные гибридные интеллектуальные системы управления // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 12 (113). С. 89-94.
16. Токарев К.Е., Лебедь Н.И. Рекуррентная нейронная сеть глубокого обучения со сверточными слоями для мультиклассового распознавания посевов сельскохозяйственных культур // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023681039, 10.10.2023. Заявка № 2023680320, 10.10.2023.

Информация об авторах:

Лебедь Никита Игоревич, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и энергетических систем, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8709-6089>, Scopus ID: 56585966900, Researcher ID: E-8723-2017, nik8872@yandex.ru

Токарев Кирилл Евгеньевич, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры математического моделирования и информатики, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5548-5637>, Scopus ID: 57202505742, Researcher ID: ABA-6440-2020, tokarevke@yandex.ru

Нехорошев Дмитрий Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и энергетических систем, Scopus ID: 57219974184, ndd.volgau@yandex.ru

Сторожаков Станислав Юрьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электрооборудования и электрохозяйства предприятий АПК, ppsts@mail.ru

Попов Александр Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технических систем в АПК, Scopus ID: 57205427388, popova8007@mail.ru

Information about the authors:

Nikita I. Lebed, doctor of technical sciences, professor of the department of power supply and energy systems, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8709-6089>, Scopus ID: 56585966900, Researcher ID: E-8723-2017, nik8872@yandex.ru

Kirill E. Tokarev, candidate of economic sciences, associate professor, associate professor of the department of mathematical modeling and informatics, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5548-5637>, Scopus ID: 57202505742, Researcher ID: ABA-6440-2020, tokarevke@yandex.ru

Dmitry D. Nekhoroshev, candidate of technical sciences, associate professor of the department of power supply and energy systems, Scopus ID: 57219974184, ndd.volgau@yandex.ru

Stanislav Yu. Storozhakov, candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department of electrical equipment and electrical facilities of agricultural enterprises, ppsts@mail.ru

Alexander Yu. Popov, candidate of technical sciences, associate professor of the department of technical systems in agriculture, Scopus ID: 57205427388, popova8007@mail.ru

References

1. Kornev, S.M., Basumatorova, E.A. (2022). Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya protsessov v rastenievodstve [Mechanization and automation of processes in crop production]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Izvestia Orenburg State Agrarian University], no. 1 (93), pp. 131-134.
2. Staroverov, B.A., Olonichev, V.V., Smirnov, M.A. (2011). Tsifrovoy adaptivnyy regulyator dlya promyshlennogo kontrollera s mnogozadachnoi POSIX-sovместимой operatsionnoy sistemoy [Digital adaptive controller for industrial controller with multi-tasking POSIX-compatible operating system]. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University], no. 3, pp. 37-39.
3. Mikhailenko, I.M. i dr. (2019). Upravlenie agrotekhnologiyami i robotizirovannye sredstva realizatsii [Management of agricultural technologies and robotic and robotic means of implementation]. *Innovatsii v sel'skom khozyaistve* [Innovations in agriculture], no. 1 (30), pp. 242-258.
4. Zykov, A.V., Yunin, V.A., Zakharov, A.M. (2019). Ispol'zovanie robototekhnicheskikh sredstv v APK [The use of robotic means in the agricultural sector]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skii zhurnal* [International research journal], no. 3 (81), pp. 8-11. doi: 10.23670/IRJ.2019.81.3.001
5. Khvostenko, T.M., Aleksanov, I.A. (2022). Vnedrenie i problematika robotekhnicheskikh sredstv v APK [Introduction and problems of robotic tools in the agro-industrial complex]. *Vestnik obrazovatel'nogo konsortsiuma Srednerusskii universitet. Seriya: Informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the educational consortium Central Russian University. Series: Information technology], no. 2 (20), pp. 4-9.
6. Lepeshko, L.S. (2019). Obzor programnykh produktov dlya avtomatizatsii v APK [Review of software products for automation in the agro-industrial complex]. *Novosti nauki v APK* [News of science in the agro-industrial complex], no. 3 (12), pp. 318-324. doi: 10.25930/2218-855X/082.3.12.2019
7. Budnikov, D.A. (2019). Razrabotka SCADA-sistemy kontrolya laboratornogo oborudovaniya i parametrov protsesssa sushki zerna [Development of a SCADA system for monitoring laboratory equipment and parameters of the grain drying process]. *Innovatsii v sel'skom khozyaistve* [Innovations in agriculture], no. 2 (31), pp. 230-237.
8. Tokarev, K. et al. (2023). Monitoring and Intelligent Management of Agrophytocenosis Productivity Based on Deep Neural Network Algorithms. In: Vasant, P., Weber, G.W., Marmolejo-Saucedo, J.A., Munapo, E., Thomas, J.J. (eds) Intelligent Computing & Optimization. *ICO 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 569. Springer, Cham. doi: 10.1007/978-3-031-19958-5_65
9. Tokarev, K.E., Rudenko, A.Yu., Kuz'min, V.A., Chernyavskii, A.N. (2021). Teoriya i tsifrovye tekhnologii intellektual'noi podderzhki prinyatiya reshenii dlya uvelicheniya bioproduktivnosti agroekosistem na osnove neirosetevykh modelei [Theory and digital technologies of intellectual decision support for increasing the bio-productivity of agroecosystems based on neural network models]. *Izvestiya*

Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa [Proceedings of Nizhnevolzhskiy agrouniversity complex], no. 4 (64), pp. 421-440. doi: 10.32786/2071-9485-2021-04-42

10. Tokarev, K.E., Lebed', N.I., Kuz'min, V.A., Chernyavskii, A.N. (2020). Teoriya i tekhnologii upravleniya orosheniyem sel'skokhozyaistvennykh kul'tur na osnove informatsionnykh tekhnologii podderzhki prinyatiya reshenii i matematicheskogo modelirovaniya [Theory and technologies for managing irrigation of agricultural crops based on information technologies for decision support and mathematical modeling]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa* [Proceedings of Nizhnevolzhskiy agrouniversity complex], no. 4(60), pp. 433-448. doi: 10.32786/2071-9485-2020-04-41

11. Lebed', N.I., Tokarev, K.E. (2022). Povyshenie produktivnosti agrofitotsenozov v usloviyakh tochnogo zemledeliya s ispol'zovaniem neirosetevykh algoritmov glubokogo obucheniya: obosnovanie primeneniya i aspekty komp'yuternoi realizatsii [Increasing the productivity of agrophytocenoses in conditions of precision farming using deep learning neural network algorithms: rationale for application and aspects of computer implementation]. *Mezhdunarodnyy sel'skokhozyaistvennyy zhurnal* [International agricultural journal], no. 6 (390), pp. 662-664. doi: 10.55186/25876740_2022_65_6_662

12. Dubenok, N.N., Borodychev, V.V., Lytov, M.N. (2019). Algoritm ucheta prostranstvennoi neodnorodnosti iskhodnykh kharakteristik oroshayemogo uchastka na osnove GIS-tekhnologii [Algorithm for taking into account the spatial heterogeneity of the initial characteristics of an irrigated area based on GIS technologies]. *Rossiiskaya sel'skokhozyaistvennaya nauka* [Russian agricultural sciences], no. 1, pp. 66-70.

13. Bereznoi, V.A., Ivashchuk, O.A., Maslakov, Y.N. (2020). Approaches for Automated Monitoring and Evaluation of In Vitro Plant's Morphometric Parameters. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, vol. 17, no. 9-10, pp. 4725-4732. doi: 10.1166/jctn.2020.9368

14. Bereznoi, V.V., Ivashchuk, O.A., Semenov, D.S. (2021). Obzor metodov i algoritmov avtomatizirovannykh sistem fenotipirovaniya rastenii [Review of methods and algorithms for automated plant phenotyping systems]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern high-tech technologies], no. 4, pp. 111-116. doi: 10.17513/snt.38624

15. Ignat'ev, V.V. (2010). Adaptivnye gibridnye intellektual'nye sistemy upravleniya [Adaptive hybrid intelligent control systems]. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering sciences], no. 12 (113), pp. 89-94.

16. Tokarev, K.E., Lebed', N.I. (2023). Rekurrentnaya neironnaya set' glubokogo obucheniya so svertochnymi sloyami dlya multiklassovogo raspoznavaniya posevov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur [Recurrent deep learning neural network with convolutional layers for multiclass recognition of crops]. *Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EHMV RU 2023681039, 10.10.2023* [Certificate of registration of the computer program RU 2023681039, 10.10.2023]. Application № 2023680320, 10.10.2023.