

Системы искусственного интеллекта в решении задач цифровизации и роботизации агропромышленного комплекса

Андрей Леонидович Ронжин,
доктор технических наук, профессор,
профессор РАН, директор,
e-mail: ronzhin@iias.spb.su;

Антон Игоревич Савельев,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
e-mail: saveliev@iias.spb.su

Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Реферат. Обосновали актуальность цифровой трансформации технологических процессов сельскохозяйственного производства в условиях обострения глобальных проблем обеспечения продовольственной безопасности, стагнации аграрного бизнеса в регионах северного Нечерноземья, а также ESG-трансформации экономики. (*Цель исследования*) Разработать алгоритмы управления беспилотных воздушных судов (БВС) на основе численных методов машинного обучения, обеспечивающих мониторинг состояния сельхозкультур и улучшение планирования и оперативного управления процессом производства. (*Материалы и методы*) Использовали оригинальные методы машинного обучения, инженерии знаний и компьютерного моделирования организационных и технологических процессов жизненного цикла технических объектов в промышленности и продукции в народном хозяйстве, а также математические и алгоритмические модели, методы и опытные образцы проактивных средств автоматизации информационного, физического и энергетического взаимодействия гетерогенных робототехнических и киберфизических комплексов. (*Результаты и обсуждение*) Создали системы искусственного интеллекта для фотограмметрической обработки изображений видимого спектра и снятых мультиспектральными видеокамерами с построением ортофотопланов, цифровых моделей рельефа. Применили численные методы машинного обучения. Показали возможность формирования рекомендаций по рекультивации, мелиорации земельных угодий. Разработали алгоритмическое, программно-аппаратное обеспечение автоматизации вертикальных ферм, установок замкнутого цикла по рыбоводству. Осуществили беспроводную регистрацию измеряемых и вычисляемых параметров с распределенных датчиков, их анализ с применением технологий больших данных и проактивное управление киберфизическими устройствами, отвечающими за функционирование систем жизнеобеспечения выращиваемых аква- и фитокультур. Привели примеры выпускаемых БВС и навесного оборудования, предназначенных для обработки сельскохозяйственных угодий, а также примеры модулей автоматизации вертикальных ферм, обеспечивающих проактивное автономное управление. (*Выводы*) Определили, что разработанное программно-аппаратное обеспечение позволило увеличить остаточный заряд аккумулятора БВС после полета на 6 процентов. Улучшили точность идентификации участков растений с фитопатологиями по анализу изображений с мультиспектральной камеры до 99 процентов.

Ключевые слова: системы искусственного интеллекта, цифровая трансформация, беспилотные воздушные суда, автоматизация вертикальных ферм, роботизация, аквакультура, северное Нечерноземье.

Для цитирования: Ронжин А.Л., Савельев А.И. Системы искусственного интеллекта в решении задач цифровизации и роботизации агропромышленного комплекса // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №2. С. 22-29. DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-2-22-29. EDN AHNJVD.

Artificial Intelligence Systems for Solving Problems of Agro-Industrial Complex Digitalization and Robotization

Andrey L. Ronzhin,
Dr.Sc.(Eng.), professor, professor of the Russian Academy
of Sciences, director, e-mail: ronzhin@iias.spb.su;

Anton I. Savel'ev,
Ph.D.(Eng.), senior researcher,
e-mail: saveliev@iias.spb.su

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. The digital transformation of agricultural technological processes is substantiated to be relevant in the context of the exacerbating global problems of food security, the agricultural business stagnation in the regions of the northern Non-Black Earth



Region, as well as the ESG transformation of the economy. (Research purpose) To develop control algorithms for unmanned aerial vehicles (UAVs) based on numerical methods of machine learning to ensure the monitoring of the crops state and the improving of the production process planning and operational management. (*Materials and methods*) The following methodology was used: the original methods of machine learning, knowledge engineering and computer modeling for organizational and technological processes of technical objects' life cycle in industry and products' life cycle in the national economy, as well as mathematical and algorithmic models, methods and prototypes of proactive automation tools for information, physical and energy interaction of heterogeneous robotic and cyber-physical complexes. (*Results and discussion*) Artificial intelligence systems were created for the photogrammetric processing of visible spectrum images and those taken with multispectral video cameras with the construction of orthophotomaps, digital elevation models. Machine learning numerical methods were applied. Possible ways of formulating recommendations for the land revegetation and amelioration were demonstrated. Algorithmic software and hardware have been developed for the automation of vertical farms, closed cycle fish farming plants. The authors carried out wireless registration of measured and calculated parameters received from the distributed sensors, conducted their analysis based on big data technologies and proactive control of cyber-physical devices responsible for the functioning of the aqua and phytocultures life support systems. The authors provided the examples of produced UAVs and attachments designed for processing the agricultural land, as well as examples of automation modules for vertical farms that provide proactive autonomous control. (*Conclusions*) It was determined that the developed software and hardware ensured a 6-percent increase in the residual charge of the UAV battery after the flight. Image analysis using a multispectral camera improved the accuracy of identifying the plant areas with phytopathologies up to 99 percent.

Keywords: artificial intelligence systems, digital transformation, unmanned aerial vehicles, automation of vertical farms, robotics, aquaculture, northern Non-Black Earth region.

For citation: Ronzhin A.L., Savel'ev A.I. Sistemy iskusstvennogo intellekta v reshenii zadach tsifrovizatsii i robotizatsii agropromyshlennogo kompleksa [Artificial intelligence systems for solving problems of agro-industrial complex digitalization and robotization]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N2. 22-29 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2022-16-2-22-29. EDN AHNJVD.

Решение задачи государственной продовольственной безопасности напрямую связано с разработкой отечественной роботизированной сельскохозяйственной техники и цифровых технологий на основе применения систем искусственного интеллекта. Проведение фундаментальных и прикладных исследований по проблемам цифровизации агропромышленного комплекса и проактивному управлению рациональным природопользованием стало ключевым направлением в развитии отечественной науки и экономики [1].

Стагнация аграрного бизнеса в регионах северо-го Нечерноземья привела к уменьшению площадей пашни, сельскохозяйственных угодий, выводу их из хозяйственного оборота, деградации производственной и социальной инфраструктуры, снижению доходов и сельской безработице, обезлюдиванию сельских территорий [2, 3]. Рассредоточенность сельскохозяйственных угодий, мелкоконтурность полей в Нечерноземной зоне России увеличивают затраты на внутрихозяйственную логистику при выращивании культур и уборке урожая, что актуализирует применение технологий больших данных, систем искусственного интеллекта для компьютерного моделирования и управления процессом планирования работы сельскохозяйственной техники. Рост конкуренции за сельскохозяйственные угодья в Черноземье и на Юге России, усиление погодно-климатических аномалий при глобальном изменении климата объективно по-

вышают роль в обеспечении продовольственной безопасности регионов с относительно невысоким агроклиматическим потенциалом, с низкой вероятностью засух, хорошо обеспеченных чистой пресной водой, к каковым принадлежит Ленинградская область и регионы Европейского Севера [4, 5].

Усиление значимости «зеленой» повестки (*ESG-трансформация*) повышает актуальность ускоренной адаптации и дополнительной поддержки инвестиций:

- в модернизацию хранения и обращения с навозом и пометом, являющихся крупными источниками эмиссии парниковых газов;
- в *No-Till, Mini-Till* технологии, уменьшающие потребление топлива при обработке земель;
- в повышение энергоэффективности на животноводческих фермах и комплексах;
- в системы точного земледелия для дозированного внесения удобрений и другие ресурсосберегающие технологии;
- в освоение комплексных цифровых систем управления в животноводстве и растениеводстве [6, 7].

Перечисленные факторы обуславливают актуальность цифровой трансформации организационно-технологических процессов и переход на роботизированные технологии сельскохозяйственного производства [8-10].

Цель исследования – разработка алгоритмов управления беспилотных воздушных судов на ос-

нове численных методов машинного обучения, обеспечивающих мониторинг состояния сельскохозяйственных культур и улучшение качества планирования и оперативного управления процессом производства.

Повышение интеллектуализации и автономизации функционирования создаваемых технических и технологических решений в области сельского хозяйства на основе систем искусственного интеллекта обеспечивает цифровую трансформацию организационных-технологических процессов агроэкологического производства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Для достижения указанной цели в рамках исследований Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН (СПб ФИЦ РАН) применяются и разрабатываются оригинальные методы машинного обучения, инженерии знаний и компьютерного моделирования организационно-технологических процессов жизненного цикла технических объектов в промышленности и продукции в народном хозяйстве, а также математические и алгоритмические модели, методы и опытные образцы проактивных средств автоматизации информационного, физического и энергетического взаимодействия гетерогенных робототехнических и киберфизических комплексов. Основное внимание СПб ФИЦ РАН уделяет междисциплинарным исследованиям на стыке информатики, робототехники и агроэкологического производства (рис. 1).

Разработана схема реализации научного задания Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН – SPIIRAS – St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences) в области информационных технологий, автоматизации, математического моделирования и фундаментального опыта Санкт-Петербургского научно-исследовательского центра экологической безопасности Российской академии наук (НИЦЭБ РАН – SRCES RAS – St. Petersburg Scientific Research Centre for Ecological Safety of the Russian Academy of Sciences), Института озераведения Российской академии наук (ИНОЗ РАН – IL RAS – Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences) в отрасли аквакультуры и экспертных знаний Института аграрной экономики и развития сельских территорий (ИАЭРСТ – IAERD – Institute of Agricultural Economics and Rural Development), Северо-западного центра междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения (СЗЦППО – N-W CIRPFM – North-West Centre of Interdisciplinary Researches of Problems of Food Maintenance), Новгородского научно-исследовательского института сельского хозяйства (НИИСХ – NSRAI – Novgorod Research Agriculture Institute) в растениеводстве и животноводстве регионов северного Нечерноземья.

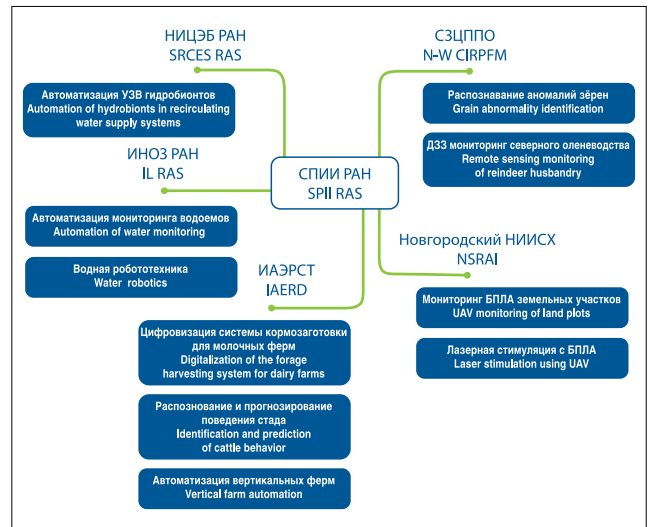


Рис. 1. Междисциплинарные исследования Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН в области сельского хозяйства:

Fig. 1. Interdisciplinary research of the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences in the field of agriculture SPC RAS

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. В направлении роботизации и автоматизации техники и технологий в агропромышленном комплексе разработаны [11-16]:

- цифровое обеспечение составления задания группе беспилотных воздушных судов (БВС) по обработке мелкоконтурных земельных участков открытого грунта (мониторинг, лазерная стимуляция, опрыскивание) и обработки результатов аэрофотосъемки;
- беспроводные средства автоматизации управления оборудованием аэро- и гидропонных вертикальных ферм и аквакультуры на установках замкнутого водоснабжения.

Для решения задач специального назначения разработано моделирование управления группой БВС в условиях активных возмущений внешней среды на основе математических моделей (рис. 2). Их диверсификация обеспечила проектирование модельно-алгоритмического обеспечения планирования и управления полетом БВС при обработке заданной сельскохозяйственной территории в ходе опрыскивания, лазерной стимуляции культур на открытом грунте.

В СПб ФИЦ РАН налажен серийный выпуск БВС и навесного оборудования к ним (рис. 3).

Последняя версия БВС имеет следующие характеристики:

- масса полезной нагрузки – до 12 кг;
- время полета – до 35 мин;
- автономные взлет и посадка;
- движение по заранее заданному маршруту;
- выполнение задач в ключевых точках.

Аппарат предназначен для распыления различных видов жидких удобрений, внесения сухих ве-

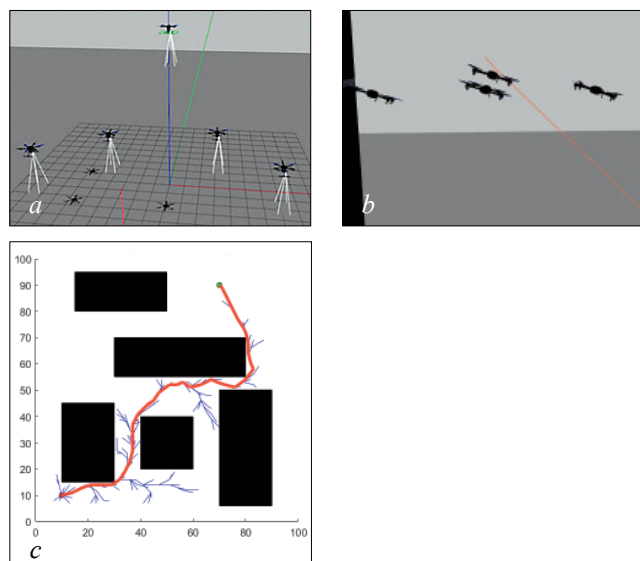


Рис. 2. Моделирование управления БВС: а – движение группы 5 БВС мультироторного типа в формации «клин» методом «лидер – ведомый»; б – моделирование движения группы БВС в формации «ромб» при сильном ветре; с – планирование траектории полета БВС в среде с препятствиями

Fig. 2. UAV control simulation: a – movement of a group of 5 multi-rotor UAVs in the “wedge” sliding mode based on the “leader-follower” method; b – modeling the group of UAVs movement in the “rhombus” mode exposed to a strong wind; c – UAV flight trajectory planning in an environment with obstacles

ществ, гранулированных удобрений, специализированных насекомых, лазерной стимуляции, мониторинга посредством мультиспектральной или видимого спектра видеокamеры.

В ходе исследования разработаны новые алгоритмы планирования движения БВС для решения сельскохозяйственных задач [17-18]. Проведено несколько полевых испытаний, в том числе собранных БВС и созданных алгоритмов движения. Разработанный алгоритм для построения траектории, равномерно покрывающей заданный участок, используется также для фотосъемки, внесения и распределения сухих и жидких удобрений по всей обрабатываемой территории. Во время маневров БВС должны замедляться, вращаться и ускоряться, увеличивается время полета и, следовательно, потребление энергии. Разработанный алгоритм рассчитывает энергоэффективную траекторию покрытия в результате сокращения маневров БВС и сглаживания пути. Для апробации энергоэффективности проведены эксперименты, которые заключались в полете БВС по трем траекториям, и сравнение остатка заряда аккумулятора после полета (табл. 1). Остаточный заряд аккумулятора после полета на двух участках увеличился на 6 процентных пунктов, то есть потребление энергии при полете БВС сократилось.

Для решения задач по доставке тяжелого оборудования до назначенной точки на карте проведен ряд



Рис. 3. Серийно выпускаемые БВС и навесное оборудование: а – пример БВС; б – лазерный блок для стимуляции растений; с – система полива; д – захват для транспортировки грузов; е – бортовая видеокamera

Fig. 3. Mass-produced UAVs and attachments: a – an UAV sample; b – laser block for plant stimulation; c – irrigation system; d – grab for goods transportation; e – onboard video camera

Таблица 1		Table 1	
СРАВНЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО ЗАРЯДА АККУМУЛЯТОРА БВС*, %			
COMPARISON OF THE UAV BATTERY REMAINING CHARGE*, %			
№ участка Plot number	Вариант 1 Option 1	Вариант 2 Option 2	Вариант 3 Option 3
1	82	84	88
2	26	30	32

*Вариант 1 – построение траектории покрытия существующим стандартным алгоритмом; вариант 2 – построение траектории с сокращением количества маневров; вариант 3 – построение траектории с оптимальным направлением развертки и сглаживанием
 *Option 1 – building a coverage trajectory using the existing standard algorithm; option 2 – building a trajectory to reduce the number of maneuvers; option 3 – building a trajectory with the optimal sweep direction and smoothing

экспериментов на реальном БВС (табл. 2). Измеряли длину пройденного пути, расчетное время полета, реальное время полета и среднюю скорость. Движение БВС в данных экспериментах проходило в среде с высоким содержанием статических препятствий. Первая полетная миссия имела самую искривленную траекторию полета, поэтому за 944 секунды БВС преодолел расстояние меньшее, чем во второй миссии. На выполнение третьей полетной миссии по перемещению БВС с грузом 8 кг на расстояние 5550 м со скоростью 10 м/с затрачена 831 секунда

да. Траектория в третьей миссии имела минимальное искривление и позволяла избегать лишних энергозатратных маневров при функционировании БВС, а также сократить расстояние до назначенной точки. Выбранная скорость движения не препятствовала БВС совершению сложных маневров по обходу различных объектов. Применение БВС для обработки сельскохозяйственных территорий обеспечивает ряд преимуществ:

- простота настройки скорости движения;
- возможность удержания положения в точке обработки на заданное время;
- стабильность полета, обеспечиваемая контроллером;
- автономное функционирование;
- применение различного программного обеспечения для реализации полетных задач.

Таблица 2		Table 2		
ДВИЖЕНИЕ В СЛОЖНОЙ СРЕДЕ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ (ВЫСОТА 35 М, МАССА ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ 8 КГ) MOVEMENT IN A DIFFICULT ENVIRONMENT WITH OBSTACLES (HEIGHT IS 35 M, PAYLOAD MASS IS 8 KG)				
Показатели Indicators	Полет 1 Flight 1	Полет 2 Flight 2	Полет 3 Flight 3	
Длина пройденного пути, м Distance traveled, m	3980	5550	5350	
Расчетное время полета, с Estimated flight time, s	657	689	689	
Реальное время полета, с Real flight time, s	944	1000	831	
Средняя скорость, м/с Average flight speed, m/s	7	7	10	

В целях комплексной автоматизации вертикальных гидропонных и аэропонных ферм и установок замкнутого водоснажения разработаны беспроводные средства сенсорной и управляющей систем (рис. 4):

- светодиодное освещение для выращиваемых растений;
- системы для контроля и автоматизации цикла выращивания;
- система мониторинга фитопатологий;
- сенсорные системы для анализа состояния среды;
- интерфейс авторизации;
- интерфейс отслеживания показателей датчиков;
- интерфейсы управления контейнерами, конфигурациями и технологиями выращивания;
- веб-интерфейсы для удаленного управления подключенными теплицами.

Разработанные средства открывают возможность прямого и удаленного управления, масштабируемости при расширении числа подключаемых ферм для контролирования процессом выращивания через Интернет.

При помощи мультиспектральной камеры, уста-

новленной на БВС, проводится съемка вертикальной фермы, что позволяет получить данные о состоянии растений. Сегментация и классификация однородных по цвету участков растений при помощи различных методов машинного обучения позволяет идентифицировать болезни. Расчет среднего значения спектрального нормализованного разностного вегетативного индекса *NDVI* позволяет определить состояние растения (рис. 4d). Результаты эксперимента достигают показателей точности 99% для обучающегося классификатора на основе метода *Random Forests*, демонстрируя его надежную работу для сегментации наличия болезней.

Обработка данных с мультиспектральной камеры БВС осуществляется несколькими способами. После виньетирования и орторектификации изображений результаты выводятся с использованием индексов растительности для определения фитопатологий. Для обработки данных изображений используются также различные инструменты: искусственные нейронные сети (*ANNs*), деревья решений (*Decision Trees*), метод *k*-средних, *k*-ближайших соседей, машины опорных векторов (*SVM*) и регрессионный анализ. Такие методы машинного обучения помогут быстро и надежно сегментировать интересующие области, а в комбинации со спектральными индексами позволят извлечь информацию о состоянии растений.

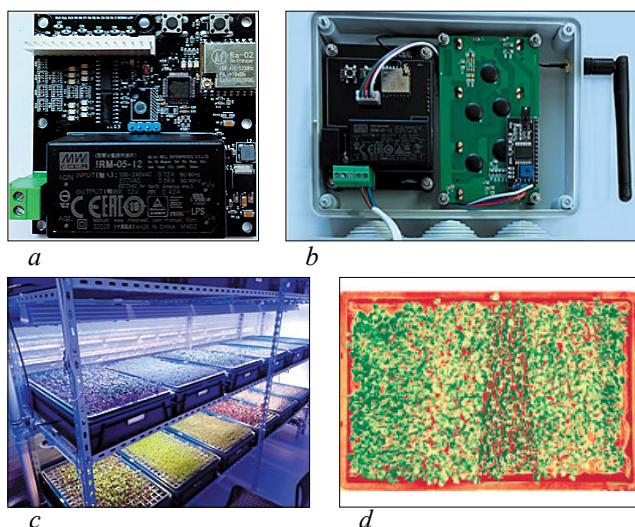


Рис. 4. Примеры автоматизации вертикальной фермы: а – беспроводной модуль управления группами света; б – беспроводной модуль управления группами устройств; в – стойка с контейнерами; д – изображение контейнера микрозелени в инфракрасном спектре для определения фитопатологий

Fig. 4. Examples of vertical farm automation: a – wireless module for light group control; b – wireless module for device group control; c – container rack; d – image of a container of microgreens in the infrared spectrum to determine phytopathologies

В направлении цифровизации сельскохозяйственного производства разрабатываются:



- тематические сервисы мониторинга и прогнозирования развития пространственных объектов и процессов;

- технологии машинного обучения распознавания скрытых аномалий семян зерна на примере анализа рентгеновских томографических изображений;

- технологии оперативного контроля здоровья и физиологического состояния стада животных для своевременной организации необходимых зооветеринарных мероприятий, корректировки рационов кормления;

- методологическое и цифровое обеспечение проектирования адаптивной системы кормопроизводства средних и малых предприятий молочного животноводства в регионах северного Нечерноземья.

Дистанционное зондирование сельскохозяйственных культур, мониторинг их состояния, аэроландшафтная оценка местности, получаемая с помощью цифровых технологий на конкретных площадях сельскохозяйственных угодий, позволит повысить качество планирования и оперативного управления процессом кормопроизводства, что повысит устойчивость производства к погодным рискам, снизит ресурсоемкость и стоимость кормов.

Выводы. Диверсификация технологий СПИИРАН с привлечением междисциплинарных фундаменталь-

ных знаний подразделений СПб ФИЦ РАН в области экологии и сельского хозяйства позволяют создавать пакетные решения по цифровизации и роботизации агропромышленного комплекса. Разработанные системы искусственного интеллекта использованы во многих сферах аграрного производства:

- мониторинг состояния земельных участков, выращиваемых культур;

- лазерная стимуляция с применением БВС;

- мониторинг фитопатологий растений;

- выявление скрытых дефектов зерна.

Комплексная автоматизация систем проактивного управления жизненным циклом производства, хранения и транспортировки продукции вертикальных ферм и аквакультуры обеспечивает не только стабильную работу, но и регистрацию всех сенсорных данных, управляющих воздействий, показателей качества и количества урожая, что обеспечивает возможность более точной интеллектуальной настройки.

Определили, что разработанное программно-аппаратное обеспечение позволило увеличить остаточный заряд аккумулятора БВС после полета на 6 п.п. Улучшили точность идентификации участков растений с фитопатологиями на основе анализа изображений с мультиспектральной камеры до 99%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №4. С. 6-10.
2. Никонова Г.Н., Трафимов А.Г., Никонов А.Г. Ресурсный потенциал и институциональные условия развития рынка сельскохозяйственных угодий // *Научное обозрение: теория и практика*. 2019. Т. 9. №12(68). С. 1758-1774.
3. Никонова Г.Н., Трафимов А.Г. Мелиоративное состояние сельскохозяйственных угодий в системе факторов эффективного их использования // *Научное обозрение: теория и практика*. 2018. №11. С. 24-40.
4. Суровцев В.Н., Никулина Ю.Н. Стратегия развития молочного скотоводства на Северо-Западе России // *Молочное и мясное скотоводство*. 2018. №6. С. 2-5.
5. Surovtsev V.N., Nikulina Yu., Payurova E. Development of organic milk production in Russia: preferred regions from the perspective of sustainability. *Agriculture Digitalization and Organic Production*. 2022. 4. 41-51.
6. Брюханов А.Ю., Попов В.Д., Васильев Э.В., Шалавина Е.В., Уваров Р.А. Анализ и решения экологических проблем в животноводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. №4. С. 48-55.
7. Dellmann T., Berns K. Toward a Realistic Simulation for Agricultural Robots. *Agriculture Digitalization and Organic Production*. 2022. 3-13.
8. Костяев А.И., Суровцев В.Н., Ронжин А.Л. Цифровизация сельского хозяйства и органическое производство // *Вестник Российской академии наук*. 2021. Т. 91. №12. С. 1179-1182.
9. Letunov S.B., Arkhipov M.V., Tyukalov Y., Danilova T., Potrakhov N., Staroverov N. Managed grain production as an element of rational nature management, ensuring the production of economically valuable grain with a minimum level of hidden damage. *Agriculture Digitalization and Organic Production*. 2022. 245. 103-112.
10. Суровцев В.Н., Паюрова Е.Н., Никулина Ю.Н., Шульгин И.К., Лужняк В.Д., Савельев А.И. Освоение цифровых технологий как фактор повышения конкурентоспособности производства органического молока // *Молочное и мясное скотоводство*. 2021. №2. С. 3-7.
11. Севостьянова Н.Н., Янин А.П., Лебедев И.В. Лазерное излучение как инструмент стимуляции роста растений // *Теория и практика мировой науки. Раздел: Сельскохозяйственные и биологические науки*. 2021. №8. С. 29-33.
12. Севостьянова Н.Н., Лебедев И.В., Лебедева В.В., Ватаманюк И.В. Инновационный подход к автоматизированной фотоактивации посевных площадей посредством БпЛА с целью стимуляции роста культур // *Информатика и автоматизация*. 2021. Т. 20. №6. С. 1395-1417.
13. Астапова М.А., Аксаментов Е.А. Использование спек-

тральных ландшафтных индексов для детектирования препятствий в задачах навигации мобильных робототехнических платформ на сельскохозяйственных территориях // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2021. Т. 25. №1. С. 66-81.

14. Качанова О.А., Левоневский Д.К. Архитектура программного обеспечения автоматизированного тепличного комплекса на основе облачных технологий // *Программная инженерия*. 2021. №9. С. 475-489.
15. Lebedev I., Lebedeva V. Analysis of «Leader – Followers» Algorithms in Problem of Trajectory Planning for a Group of Multi-rotor UAVs. *Software Engineering Application in Informatics*. 2021. 1. 870-884.

16. Krestovnikov K., Korshunov D., Erashov A., Rogozin A. Scalable Architecture of Distributed Control System for Industrial Greenhouse Complexes. *Data Science and Intelligent Systems*. 2021. 2. 127-132.
17. Крестовников К.Д., Ерашов А.А., Васюнина Ю.Г., Савельев А.И. Разработка устройства сопряжения для модульной сельскохозяйственной робототехнической платформы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2022. Т. 16. №1. С. 78-88.
18. Izhboldina V., Lebedev I., Shabanova A. Approach to UAV swarm control and collision-free reconfiguration. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2021. 187. 81-92.

REFERENCES

1. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Tsifrovye tekhnologii i robotizirovannyye tekhnicheskiye sredstva dlya sel'skogo hozyaystva [Digital technologies and robotic devices in the agriculture]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. №4. 6-10 (In Russian).
2. Nikonova G.N., Trafimov A.G., Nikonov A.G. Resursnyy potentsial i institutsional'nye usloviya razvitiya rynka sel'skokhozyaystvennykh ugodiy [Resource potential and institutional conditions for the development of the agricultural land market]. *Nauchnoe obozrenie: teoriya i praktika*. 2019. Vol. 9. №12(68). 1758-1774 (In Russian).
3. Nikonova G.N., Trafimov A.G. Meliorativnoe sostoyanie sel'skokhozyaystvennykh ugodiy v sisteme faktorov effektivnogo ikh ispol'zovaniya [Ameliorative condition of agricultural land in the system of factors for their effective use]. *Nauchnoe obozrenie: teoriya i praktika*. 2018. №11. 24-40 (In Russian).
4. Surovtsev V.N., Nikulina Yu.N. Strategiya razvitiya molochnogo skotovodstva na Severo-Zapade Rossii [Strategy of dairy cattle development in the north-west of Russia]. *Molochnoe i myasnoe skotovodstvo*. 2018. №6. 2-5 (In Russian).
5. Surovtsev V.N., Nikulina Yu., Payurova E. Development of organic milk production in Russia: preferred regions from the perspective of sustainability. *Agriculture Digitalization and Organic Production*. 2022. 4. 41-51 (In English).
6. Bryukhanov A.Yu., Popov V.D., Vasil'ev E.V., Shalavina E.V., Uvarov R.A. Analiz i resheniya ekologicheskikh problem v zhivotnovodstve [Analysis and solutions to environmental problems in livestock farming]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Vol. 15. №4. 48-55 (In Russian).
7. Dellmann T., Berns K. Toward a Realistic Simulation for Agricultural Robots. *Agriculture Digitalization and Organic Production*. 2022. 3-13 (In English).
8. Kostyaev A.I., Surovtsev V.N., Ronzhin A.L. Tsifrovizatsiya sel'skogo khozyaystva i organicheskoe proizvodstvo [Digitalization of agriculture and organic production]. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*. 2021. Vol. 91. №12. 1179-1182 (In Russian).
9. Letunov S.B., Arkhipov M.V., Tyukalov Y., Danilova T., Potrakhov N., Staroverov N. Managed grain production as an element of rational nature management, ensuring the production of economically valuable grain with a minimum level of hidden damage. *Agriculture Digitalization and Organic Production*. 2022. 245. 103-112 (In English).
10. Surovtsev V.N., Payurova E.N., Nikulina Yu.N., Shul'gin I.K., Luzhnyak V.D., Savel'ev A.I. Osvoenie tsifrovyykh tekhnologiy kak faktor povysheniya konkurentosposobnosti proizvodstva organicheskogo moloka [Digital technologies application as a factor in increasing organic milk production competitiveness]. *Molochnoe i myasnoe skotovodstvo*. 2021. №2. 3-7 (In Russian).
11. Sevost'yanova N.N., Yanin A.P., Lebedev I.V. Lazernoe izluchenie kak instrument stimulyatsii rosta rasteniy [Laser radiation as a tool for stimulating plant growth]. *Teoriya i praktika mirovoy nauki. Razdel: Sel'skokhozyaystvennyye i biologicheskiye nauki*. 2021. №8. 29-33 (In Russian).
12. Sevost'yanova N.N., Lebedev I.V., Lebedeva V.V., Vatamanuk I.V. Innovatsionnyy podkhod k avtomatizirovannoy fotoaktivatsii posevnykh ploshchadey posredstvom BpLA s tsel'yu stimulyatsii rosta kul'tur [An innovative approach to automated photo-activation of crop acreage using uavs to stimulate crop growth]. *Informatika i avtomatizatsiya*. 2021. Vol. 20. №6. 1395-1417 (In Russian).
13. Astapova M.A., Aksamentov E.A. Ispol'zovanie spektral'nykh landshaftnykh indeksov dlya detektirovaniya prepyatstviy v zadachakh navigatsii mobil'nykh robototekhnicheskikh platform na sel'skokhozyaystvennykh territoriyakh [Use of spectral landscape indices for obstacle detection in the tasks of mobile robotic platforms navigation in agricultural areas]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. 2021. Vol. 25. №1. 66-81 (In Russian).
14. Качанова О.А., Левоневский Д.К. Архитектура программного обеспечения автоматизированного тепличного комплекса на основе облачных технологий [Software architecture of an automated greenhouse complex based on cloud technologies]. *Программная инженерия*. 2021. №9. 475-489 (In Russian).
15. Lebedev I., Lebedeva V. Analysis of «Leader – Followers»

- Algorithms in Problem of Trajectory Planning for a Group of Multi-rotor UAVs. *Software Engineering Application in Informatics*. 2021. 1. 870-884 (In English).
16. Krestovnikov K., Korshunov D., Erashov A., Rogozin A. Scalable Architecture of Distributed Control System for Industrial Greenhouse Complexes. *Data Science and Intelligent Systems*. 2021. 2. 127-132 (In English).
17. Krestovnikov K.D., Erashov A.A., Vasyunina Yu.G., Savel'ev A.I. Razrabotka ustroystva sopryazheniya dlya modul'noy sel'skokhozyaystvennoy robototekhnicheskoy platformy [Development of interface device for modular agricultural robotic platform]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2022. Vol. 16. N1. 78-88 (In Russian).
18. Izhboldina V., Lebedev I., Shabanova A. Approach to UAV swarm control and collision-free reconfiguration. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2021. 187. 81-92 (In English).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

Ронжин А.Л. – выбор основных направлений исследований, систематизация результатов исследований, формирование общих выводов.

Савельев А.И. – разработка модельно-алгоритмического обеспечения, постановка экспериментов, обработка результатов исследований.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Coauthors' contribution:

Ronzhin A.L. – selection of main research directions, research results systematization, formulating general conclusions.

Saveliev A.I. – development of models and algorithms, conducting experiments, research result processing.

The authors read and approved the final manuscript.

Статья поступила в редакцию
Статья принята к публикации

The paper was submitted to the Editorial Office on
The paper was accepted for publication on

08.02.2022
28.04.2022