



НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
Основан в 2007 году

Журнал зарегистрирован  
Федеральной службой по надзору  
в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций  
(РОСКОМНАДЗОР)  
Свидетельство ПИ № ФС77-84201  
от 22 ноября 2022 г.

Журнал включен в перечень изданий,  
рекомендованных ВАК РФ для публика-  
ции трудов соискателей ученых степе-  
ней кандидата и доктора наук по специ-  
альностям: 4.1.5 / 4.3.1 / 4.3.2 / 5.6.6.

Журнал включен  
в Российский индекс  
научного цитирования (РИНЦ)

Полные тексты статей  
размещены на сайте электронной  
научной библиотеки: <http://elibrary.ru>

Охраняется законом РФ № 5351-1  
«Об авторском праве и смежных правах»  
от 9 июля 1993 года. Контент распростра-  
няется под лицензией Creative Commons  
Attribution 4.0 License. Нарушение закона  
будет преследоваться в судебном порядке.

НАД НОМЕРОМ РАБОТАЛИ:

В.В. Бижаев,  
Г.В. Быковская,  
Л.А. Горелова,  
Р.М. Нурбагандова  
Перевод – Светлана Сорокина

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

109428, Москва,  
1-й Институтский проезд, 5, стр. 1.  
Телефоны: (499) 174-88-11  
(499) 174-89-01

<http://www.vimsmit.com>  
e-mail: [smit@vim.ru](mailto:smit@vim.ru)

Мнение редакции не всегда совпадает  
с позицией авторов публикаций.  
Ответственность за достоверность  
изложенных фактов и правильность  
цитат несут авторы.  
Не принятые к публикации статьи не воз-  
вращаются и не рецензируются.

Выходит 4 раза в год  
(Свободная цена)

Дата выхода в свет 19.06.2025  
Формат 60х90/8. Объем 10,25 печ.л.

Тираж 500 экз

Отпечатано в типографии  
ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

© ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2025

# Сельскохозяйственные МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ АГРОИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР ВИМ»

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Андрей Юрьевич Измайллов**

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, член Президиума Российской академии наук, директор Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская Федерация, [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=527153](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=527153)

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Яков Петрович Лобачевский** (НАУЧНЫЙ РЕДАКТОР)

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук Российской академии наук, Москва, Российская Федерация, [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=369308](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=369308)

**Алексей Семенович Дорохов**

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, заместитель директора по на-  
учно-организационной работе Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская  
Федерация, [https://www.elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=550644](https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=550644)

**Михаил Никитичевич Ерохин**

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, Российский государственный  
аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева, Москва, Рос-  
сийская Федерация, [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=626708](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=626708)

**Юрий Анатольевич Иванов**

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Российской академии наук, главный научный со-  
трудник Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская Федерация,  
[https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=672993](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=672993)

**Йошисукэ Кишида**

академик, Президент компании «Шин-Норинша», г. Токио, Япония

**Юрий Федорович Лачуга**

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, член Президиума Российской  
академии наук, Москва, Российская Федерация, [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=365637](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=365637)

**Антонин Махалек**

доктор технических наук, директор Научно-исследовательского института сельскохозяйственной техники,  
г. Прага, Чешская Республика

**Владимир Дмитриевич Попов**

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, руководитель научного на-  
правления Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация, [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=684252](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=684252)

**Синьминь Лю**

профессор, ректор Циндаоского аграрного университета, г. Циндао, Китайская Народная Республика

**Жарылкасын Сарсембекович Садыков**

доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института агроинженерных про-  
блем и новых технологий Казахского национального агроуниверситета, г. Алматы, Республика Казахстан

**Даврон Рустамович Норчаев**

доктор технических наук, старший научный сотрудник, руководитель лаборатории «Механизации садовод-  
ства и овощеводства» Научно-исследовательского института механизации сельского хозяйства Респуб-  
лики Узбекистан, г. Карши, Кашкадарьинская область, Республика Узбекистан

**Юлия Сергеевна Ценц**

доктор технических наук, доцент, член-корреспондент Российской академии наук, заместитель директора  
по образовательной и редакционно-издательской деятельности Федерального научного агроинженерного  
центра ВИМ, Москва, Российская Федерация,  
[https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=816741](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=816741)

**Вячеслав Иванович Черноиванов**

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, Федеральный научный  
агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация, [https://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=552570](https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=552570)

**Роман Алексеевич Фандо**

доктор исторических наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Инсти-  
тут истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова Российской академии наук, Москва, Российская  
Федерация, [https://www.elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=124382](https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?id=124382)

**SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL**  
Founded in 2007

The journal is registered  
by Federal Agency for Supervision  
of Legislation Observance of Mass  
Communications Sphere  
and Cultural Heritage Protection  
Certificate ПИ No. ФС77-84201  
from November, 22, 2022

The Journal is included in the list  
of peer-reviewed scientific  
publications recommended  
by the Higher Attestation Commission  
for publishing the research results  
of studies and theses for Ph.D. and  
Dr.Sc. degrees in scientific  
specialties 4.1.5 / 4.3.1 / 4.3.2 / 5.6.6.

The journal is included in the  
Russian Index of Scientific Citation  
(RISC).

Full texts of articles are placed on  
the website of electronic library:  
elibrary.ru

Protected by the Russian Federal  
Law RF №5351-1 "On Copyright  
and Related Rights" dated July 9,  
1993. Content is distributed under  
Creative Commons Attribution 4.0  
License. Violations are subject to  
prosecution.

#### EXECUTIVE EDITORS:

Bizhaev V.V.,  
Bykovskaya G.V.,  
Gorelova L.A.,  
Nurbagandova R.M.  
Translation into English –  
Svetlana Sorokina

#### EDITORIAL OFFICE'S ADDRESS

109428, Moscow,  
1st Institutskiy proezd, 5, bild. 1.  
Tel.: +7 (499) 174-88-11  
+7 (499) 174-89-01

<http://www.vimsmit.com>  
e-mail: [smit@vim.ru](mailto:smit@vim.ru)

## [SEL'SKOKHOZYAYSTVENNYE MASHINY I TEKHNologii]

**Founder and publisher: Federal State Budgetary Scientific Institution**  
"Federal Scientific Agroengineering Center VIM" of the Russian Academy of Sciences

#### EDITOR-IN-CHIEF

**Andrey Yu. Izmaylov**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Academic Board Member of the Russian Academy of Sciences, Director of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

#### EDITORIAL BOARD

**Yakov P. Lobachevskiy** (SCIENTIFIC EDITOR)

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Academician Secretary of Department of Agricultural Sciences at the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

**Aleksey S. Dorokhov**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Scientific and Organizational Work of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Mikhail N. Erokhin**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

**Yuriy A. Ivanov**

Dr.Sc.(Agr.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences; Chief Researcher of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Yoshisuke Kishida**

Academician, President Shin-Norinsha Co., LTD, Tokyo, Japan

**Yuriy F. Lachuga**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Academic Board Member of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

**Antonin Makhalek**

Dr.Sc.(Eng.), Director of the Agricultural Machinery Research Institute, Prague, Czech Republic

**Vladimir D. Popov**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Research Direction of the Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production, St.Peterburg, Russian Federation

**Xinmin Liu**

Professor, Rector of Qingdao Agricultural University, Qingdao, People's Republic of China

**Zharylkasyn S. Sadykov**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Director of Research Institute of Agroengineering Problems and New Technologies, Kazakh National Agrarian University, Almaty, Republic of Kazakhstan

**Davron R. Norchaev**

Dr.Sc.(Eng.), Senior Researcher, Head of the «Mechanization of Horticulture and Vegetable Growing» Laboratory of the Scientific Research Institute of Agricultural Mechanization of the Republic of Uzbekistan, Karshi city, Kashkadarya region, Republic of Uzbekistan

**Yuliya S. Tsench**

Dr.Sc.(Eng.), Associate Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Educational, Editorial and Publishing Activities of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Vyacheslav I. Chernov**

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Roman A. Fando**

Dr.Sc.(Hist.), Director of the Federal State Budgetary Institution of Science S.I. Vavilov Institute of History of Natural Science and Technology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

The opinion of the editorial board does not always coincide with the position of the authors of publications. Responsibility for the accuracy of the stated facts and correctness citations are carried by the authors. Articles not accepted for publication are not returned and are not reviewed.

Published 4 times a year (open price).

Publication date is 19.06.2025.

The format is 60 x 90/8. The volume is 10.25 print's sheets. The circulation is 500 copies.

Printed by FSBSI FSAC VIM.



## ЭКОЛОГИЯ

- Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Егоров С.А.**  
Автоматизированная система управления  
биоферментатором барабанного типа ..... 4
- Керимов М.А., Ветушко В.И.**  
Эколого-эргономические аспекты функционирования  
технологий возделывания подсолнечника ..... 11

## ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

- Гапон Н.В., Воронин В.В., Рудой Д.В.,  
Жданова М.М.**  
Модифицированный SLAM для навигации  
сельскохозяйственных роботов ..... 19
- Доржиев С.С., Базарова Е.Г.**  
Инфраструктура цифрового пастбищного  
животноводства в аридных зонах ..... 26
- Каличкин В.К., Максимович К.Ю.,  
Алещенко О.А., Алещенко В.В.**  
Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных  
культур: структура данных и методы искусственного  
интеллекта ..... 33
- Чешкова А.Ф., Риксен В.С.**  
Обнаружение болезней земляники садовой  
с использованием мультиспектральной съемки с БПЛА ..... 45

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

- Лобачевский Я.П., Миронов Д.А.**  
Противоизносные характеристики железоуглеродистых  
твердосплавных покрытий рабочих органов  
почвообрабатывающих машин ..... 53
- Годжаев З.А., Васильев С.А., Мишин С.А.,  
Ружанов Е.В.**  
Автоматизированный машинно-тракторный  
агрегат для кормопроизводства ..... 64
- Фирсов А.С., Сизов И.В., Пак Л.Н.**  
Лабораторно-полевые исследования высевальной  
системы при мозаичном посеве ..... 72
- Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С., Беляева Н.И.**  
Автоматизированная почвообрабатывающая машина  
для послойной обработки почвы высокотурбулентной  
воздушной струей ..... 78
- Бидеев С.И., Гулуева Л.Р.**  
Малогабаритный агрегат для восстановления горных  
лугопастбищных земель ..... 84

## ECOLOGY

- Briukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Egorov S.A.**  
Automated control system for drum-type  
biofermenter ..... 4
- Kerimov M.A., Vetushko V.I.**  
Ecological and ergonomic aspects of operating hybrid  
sunflower cultivation technologies ..... 11

## DIGITAL TECHNOLOGIES. ARTIFICIAL INTELLIGENCE

- Gapon N.V., Voronin V.V., Rudoy D.V.,  
Zhdanova M.M.**  
Modified SLAM for agricultural robot  
navigation ..... 19
- Dorzhiyev S.S., Bazarova E.G.**  
Infrastructure for digital pasture-based livestock  
production in arid zones ..... 26
- Kalichkin V.K., Maksimovich K.Yu.,  
Aleshchenko O.A., Aleshchenko V.V.**  
Crop yield prediction: data structure and Ai-powered  
methods ..... 33
- Cheshkova A.F., Riksen V.S.**  
Strawberry disease detection using multispectral  
UAV imagery ..... 45

## INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

- Lobachevsky Ya.P., Mironov D.A.**  
Anti-wear properties of iron-carbon hard alloy  
coatings for working bodies of tillage machinery ..... 53
- Godzhaev Z.A., Vasiliev S.A., Mishin S.A.,  
Ruzanov E.V.**  
Automated machine-tractor unit for grass mowing ..... 64
- Firsov A.S., Sizov I.V., Pak L.N.**  
Laboratory and field studies of the sowing system  
for mosaic sowing ..... 72
- Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S., Belyaeva N.I.**  
Automated layer-by-layer soil tillage machine using  
a highly turbulent air jet ..... 78
- Bideev S.I., Gulueva L.R.**  
A small-sized unit for the restoration of mountain  
grass lands ..... 84



## Автоматизированная система управления биоферментатором барабанного типа

**Александр Юрьевич Брюханов,**  
доктор технических наук, академик РАН,  
главный научный сотрудник,  
e-mail: sznii@yandex.ru;

**Эдуард Вадимович Васильев,**  
кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
e-mail: sznii6@yandex.ru;  
**Семен Алексеевич Егоров,**  
младший научный сотрудник,  
e-mail: simon723132@yandex.ru

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФНАЦ ВИМ, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Реферат.** Современное производство требует внедрения автоматизированных систем управления для повышения эффективности, точности и безопасности технологических процессов. В аграрных отраслях к сложным технологиям относится переработка или утилизация органических отходов путем биотрансформации или деградации. Эти процессы проходят в несколько фаз, и каждая требует различных режимов. Для повышения их эффективности необходима автоматизированная система, позволяющая контролировать процесс биотермической реакции и управлять режимами работы биоферментатора в зависимости от фазы переработки органических отходов. *(Цель исследования)* Разработать автоматизированную систему управления биоферментатором барабанного типа. *(Материалы и методы)* Исследования проведены на экспериментальном биоферментаторе барабанного типа в условиях аэрации перерабатываемой органической массы. Автоматизированная система управления работы ферментатора построена по трехуровневой структуре: верхний уровень (сервер и автоматизированное рабочее место оператора), средний уровень (программируемый логический контроллер) и нижний уровень (датчики и исполнительные механизмы). Для измерения температуры в биореакторе используются датчики термосопротивления, размещенные в погружных гильзах. Расход воздуха рассчитывается на основе показаний датчиков перепада давления. Частота вращения барабана определяется с помощью оптического бесконтактного датчика. *(Результаты и обсуждение)* Предлагаемая система управления обеспечивает автоматизированный контроль параметров процесса переработки и управление режимами биоферментатора. Система успешно прошла испытания, корректно отображая температуру смеси, расхода воздуха на аэрацию и вращение барабана. АСУ позволяет оперативно изменять режимы и определять оптимальные параметры переработки органических отходов. *(Выводы)* Автоматизированная система управления процессом переработки органических отходов в биоферментаторе барабанного типа обеспечивает мониторинг параметров, что позволит определить оптимальные режимы работы и алгоритмы их корректировки для различных типов органических смесей и получить качественный конечный продукт.

**Ключевые слова:** автоматизированная система управления, биоферментатор барабанного типа, переработка органических отходов.

■ **Для цитирования:** Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Егоров С.А. Автоматизированная система управления биоферментатором барабанного типа // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №2. С. 4-10. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-4-10. EDN: PFNHMB.

Scientific article

## Automated Control System for Drum-Type Biofermenter

**Alexander Yu. Briukhanov,**  
Dr.Sc.(Eng.), academician of the RAS,  
chief researcher,  
e-mail: sznii@yandex.ru;

**Eduard V. Vasilev,**  
Ph.D.(Eng.), leading researcher,  
e-mail: sznii6@yandex.ru;  
**Semen A. Egorov,**  
junior researcher, e-mail: simon723132@yandex.ru

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Saint Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** Modern production increasingly relies on the implementation of automated control systems to improve the efficiency, precision, and safety of technological processes. In the agricultural sector, complex technologies involve the processing or disposal of organic waste through biotransformation or degradation. These processes occur in multiple phases, each requiring specific operating conditions. To enhance overall effectiveness, there is a need for an automated system capable of monitoring the biothermal reaction process and managing the operational modes of a biofermenter in accordance with the current phase of organic waste processing. *(Research purpose)* The aim of this research is to develop an automated control system for a drum-type biofermenter. *(Materials and methods)* The study was conducted using an experimental drum-type biofermenter operating under conditions of aeration of the processed organic matter. The automated control system is built on a three-level architecture: the upper level consists of a server and an operator's automated workstation, the middle level includes a programmable logic controller, and the lower level comprises sensors and actuators. Temperature inside the bioreactor is measured using resistance temperature detectors housed in immersion sleeves. Airflow is calculated based on readings from a differential pressure sensor. The drum's rotation speed is monitored using an optical non-contact sensor. *(Results and discussion)* The proposed control system enables automated monitoring of key processing parameters and supports effective management of the biofermenter's operating modes. Testing demonstrated the system's ability to accurately monitor and display the mixture temperature, aeration airflow, and drum rotation speed. The system also allows for rapid mode adjustments to operating modes and facilitates the identification of optimal parameters for efficient organic waste processing. *(Conclusions)* The automated control system for organic waste processing in a drum-type biofermenter ensures continuous monitoring of key parameter. This capability facilitates the identification of optimal operating modes and the development of adjustment algorithms tailored to different types of organic mixtures, ultimately contributing to the production of a high-quality end product.

**Keywords:** automated control system, drum-type biofermenter, organic waste processing.

■ **For citation:** Briukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Egorov S.A. Automated control system for drum-type biofermenter. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N2. 4-10 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-4-10. EDN: PFNHMB.

Внедрение в производственные процессы цифровых технологий и автоматизированных систем управления (АСУ) позволяет значительно повысить эффективность, точность и безопасность выполнения производственных операций [1]. Одна из ключевых возможностей АСУ заключается в обеспечении непрерывного мониторинга и управления параметрами в режиме реального времени [2]. Благодаря этому возможно реализовать алгоритмы управления процессами с обратной связью, когда сигнал управления формируется на основе отклонения управляемой величины [3]. Такие алгоритмы позволяют обеспечить стабильность выполнения технологических процессов, на конечный результат которых влияют десятки параметров [4].

В животноводстве к сложным процессам относится интенсивная переработка органических отходов в ферментаторе барабанного типа [5]. Технология основана на биоконверсии органических отходов под действием аэробных термофильных микроорганизмов с получением в качестве конечных продуктов органических удобрений [6]. Возможность полной автоматизации процесса в закрытом реакторе делает данную технологию перспективной для внедрения в промышленных масштабах.

Разложение органических отходов (компостирование) происходит при перемешивании, аэрации и перемещении материала [7]. Однако, сам процесс в биореакторе проходит в несколько связанных с

температурным режимом фаз: психрофильную (температура смеси до 20 °С), мезофильную (температура смеси в диапазоне 20-40 °С) и термофильную (температура смеси выше 40 °С) [8]. Для каждой фазы требуются контроль и корректировка технологических параметров работы биоферментатора [9]. Оптимально подобранные режимы позволяют сократить срок переработки, сохранить большее количество питательных элементов и снизить объем выбросов климатически активных (углекислый газ и закись азота) и загрязняющих веществ (аммиак) [10].

Длительность каждой фазы зависит от множества параметров перерабатываемого материала (влажность, плотность, соотношение углерода к азоту, pH, микробиологические показатели и др.), значения которых изменяются в больших диапазонах [11]. Показателем фазы процесса может выступать температура переработки смеси, которая нагревается в результате жизнедеятельности термофильных аэробных микроорганизмов – так называемой биотермической реакции [12]. В зависимости от температуры перерабатываемой смеси возможно обеспечить изменение параметров работы биоферментатора в автоматическом режиме.

Для решения этой задачи необходима АСУ с возможностью мониторинга температуры смеси и управлением режимами работы биоферментатора в зависимости от фазы переработки. Режим работы определяется: интервалом включения вентилятора аэрации; объемом подаваемого воздуха при

включении аэрации; расходом воздуха вытяжного вентилятора; интервалом и количеством оборотов барабана.

**Цель исследования** – разработать автоматизированную систему управления биоферментатором барабанного типа для повышения эффективности процесса ферментации органических отходов.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Исследования проводились в лаборатории биоконверсии органических отходов ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. Объектом автоматизации является экспериментальный биоферментатор барабанного типа. Биоферментатор длиной 2,8 м с внутренним диаметром 0,8 м оснащен загрузочным и выгрузным устройствами, приводом вращения барабана, напорным вентилятором аэрации и вытяжным вентилятором.

Автоматизированная система управления построена по типовой трехуровневой структуре (верхний, средний, нижний) (Филатов В.В., Мишаков В.Ю., Женжебир В.Н. и др. Автоматизация систем управления предприятий легкой промышленности: отраслевой и региональный аспект. М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2021. 353 с.). Схема комплекса технических средств системы представлена на *рисунке 1*.

Верхний уровень управления представлен сервером, роль которого выполняет ноутбук *DELL Inspiron 5758*, расположенный непосредственно в

помещении, где осуществляется технологический процесс. Ноутбук одновременно с сервером выступает в роли автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора (Бывайков М.Е., Полетыкин А.Г., Степанов В.Н., Сахabetдинов И.У. Программный интерфейс между верхними и нижними уровнями автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) атомной электростанции. М.: ИПУ РАН, 2021. 113 с.). Помимо этого предусмотрена возможность управления установкой с помощью переключателей и кнопок, введенных на щит управления.

Основным исполнительным устройством среднего уровня служит программируемый логический контроллер (ПЛК) *EKF PRO-Logic F200-12A-R-P10* с дополнительным модулем расширения дискретного ввода-вывода *EMF-D-8X8Y-R*. Связь между ПЛК и *UTP*-сервером осуществляется по *Ethernet* интерфейсу через открытый промышленный протокол *Modbus TCP* (Баронов В.В., Калянов Г.Н., Попов Ю.Н., Титовский И.Н. Информационные технологии и управление предприятием. Саратов: Профобразование, 2017. 327 с.). К ПЛК через модуль расширения подключены кнопки и переключатели для ручного управления оборудованием биоферментатора, а также сигнализирующие лампы.

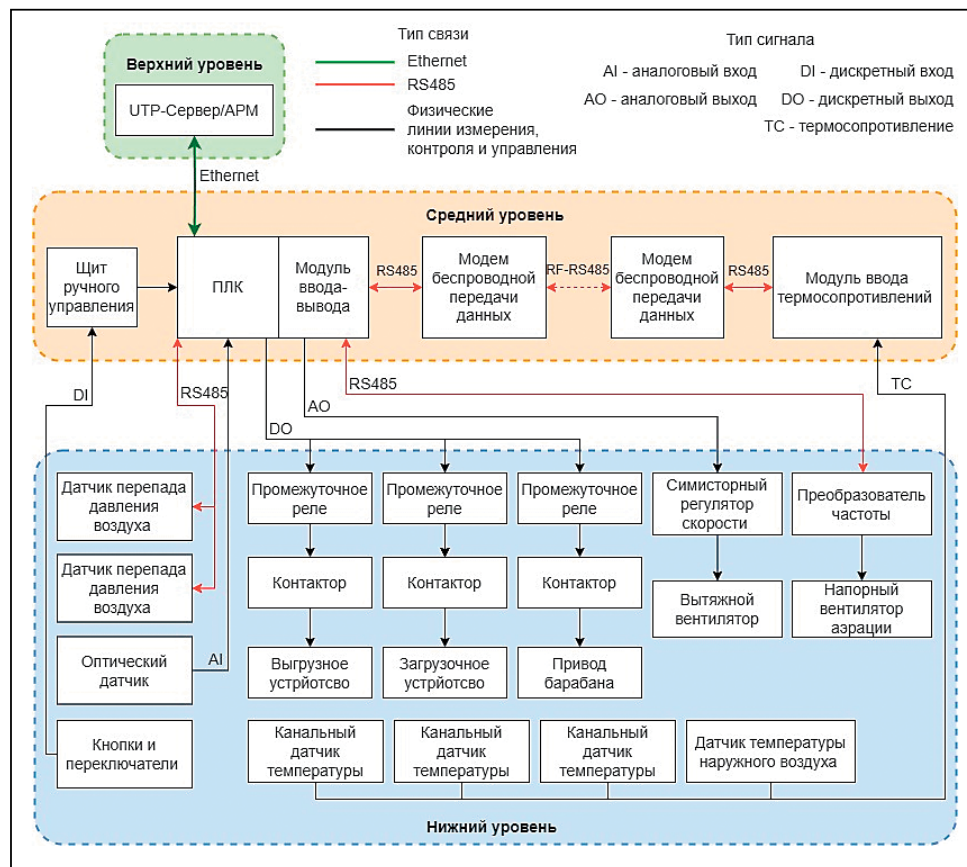


Рис. 1. Структурная схема комплекса технических средств системы

Fig. 1. Block diagram of the system's technical equipment

Дополнительными устройствами являются модемы беспроводной передачи данных *EKF PROxima WDT LoRa 433 L20* (2 шт.), через которые осуществляется обмен данными между ПЛК и модулем ввода термосопротивлений *EKF PRO-Logic REMF 4* по интерфейсу *RS-485*. Применение модуля беспроводной связи обусловлено тем, что датчики температуры находятся на корпусе барабана, который периодически вращается, поэтому невозможно обеспечить стабильное непрерывное проводное соединение.

Модули ввода термосопротивлений и беспроводной передачи данных запитаны через источник бесперебойного питания (ИБП) 12V и преобразователь напряжения 12-24V.

В момент, когда барабан не вращается, питание на ИБП поступает от щита управления через скользящий контакт, расположенный на торце барабана.

Нижний уровень управления – контрольно-измерительные приборы и исполнительные механизмы (датчики, электроприводы, кнопки, сигнальные лампы). Для измерения температуры смеси накладные датчики *EKF RTD10-OVH30-PT1000* (3 шт.) размещены в нержавеющей гильзах длиной 250 мм на одинаковой глубине. Из-за того, что смесь заполняет барабан на 70-80%, датчики температуры расположены посередине глубины смеси. Гильзы установлены в трех точках барабана (загрузочной, средней, выгрузной). Датчики температуры подключены к модулю ввода термосопротивлений монтажным кабелем.

К этому же модулю подключен датчик температуры наружного воздуха *EKF RTD20-OUT1-PT1000*. Аналоговый сигнал от датчиков термосопротивлений, поступая на модуль ввода термосопротивлений, преобразует цифровой сигнал и передается на программируемый логический контроллер через беспроводное соединение с помощью модемов беспроводной передачи данных по интерфейсу RS-485.

Скорость воздушного потока на входе и выходе биоферментатора измеряется датчиками перепада давления *IECON ADPS-XXN5KP5-C04-C*, подключенными к ПЛК по интерфейсу RS-485. В управляющей программе ПЛК заложен алгоритм пересчета перепада давления в расход воздушного потока с учетом диаметра воздухопроводов и температуры воздушного потока.

Для отсчета вращений и определения угла поворота барабана используется оптический бесконтактный датчик *EKF PROXIS-3R-18-2-N-NO+NC-2*, выдающий дискретный сигнал напрямую в ПЛК.

Исполнительными механизмами нижнего уровня является оборудование, которым оснащен биоферментатор. Выгрузное, загрузочное устройства и привод барабана управляются через промежуточное реле, на которое подается дискретный сигнал с ПЛК. Через это реле осуществляется запуск контакторов, активирующих механизмы.

Управление вентилятором аэрации осуществляется преобразователем частоты *EKF VECTOR-80*, подключенным к ПЛК по интерфейсу RS-485. Для управления вытяжным вентилятором используется симисторный регулятор скорости СРМ 2,5Щ, управляемый аналоговым сигналом (0-10 В) через ПЛК.

В качестве инструментальной системы для реализации человеко-машинного интерфейса АРМ используется программный комплекс *SCADA TRACE MODE 7* (*SCADA*, *SOFTLOGIC* и *MES*-система). Программа разработана в России (компания «АдАстра» внесена в Реестр отечественного ПО № 4119).

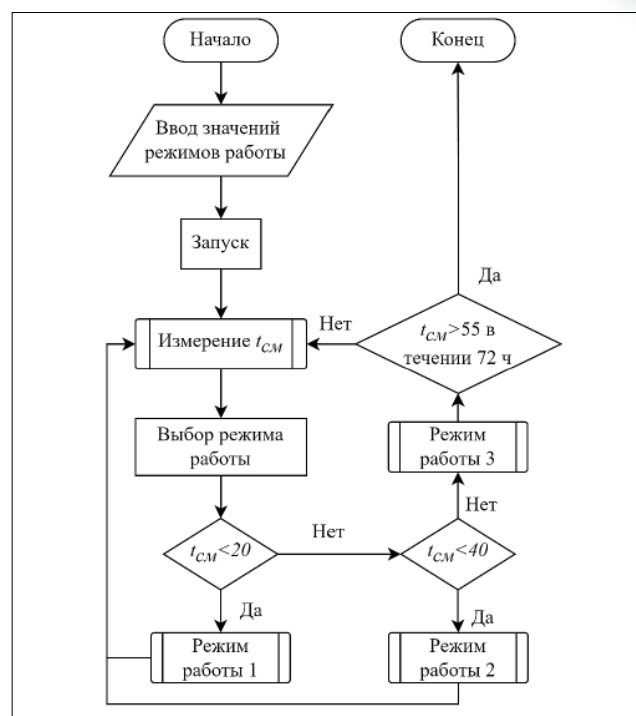


Рис. 2. Упрощенный алгоритм управляющей программы  
Fig. 2. Simplified flowchart of the control program

Управляющая программа системы выполнена на языке функциональных блок-диаграмм (*Function Block Diagram, FBD*) – графический язык программирования стандарта МЭК 61131-3. Упрощенный алгоритм управляющей программы представлен на рисунке 2.

Началом процесса является ввод значений режимов работы биоферментатора. На данном этапе в алгоритм заложено три режима, которые определяются средней температурой перерабатываемой смеси ( $t_{см}$ ). Первый режим работы соответствует температуре смеси до 20 °С, второй — диапазону 20-40 °С, третий — при достижении 40 °С и выше.

Вводятся следующие параметры режимов работы:

- интервал включения аэрации ( $T_{аэр}^{1-3}$ , с);
- объем подаваемого воздуха в интервал включения вентилятора аэрации ( $V_{аэр}^{1-3}$ , м<sup>3</sup>);
- расход вытяжного вентилятора ( $Q_{выт}^{1-3}$ , м<sup>3</sup>/ч);
- интервал вращения барабана ( $T_6^{1-3}$ , с);
- число оборотов барабана за интервал вращения ( $n^{1-3}$ , об.).

Средняя температура смеси ( $t_{см}$ ) вычисляется расчетным блоком, как среднее арифметическое суммы показаний с датчиков температуры смеси.

Процесс переработки органических отходов [13] запускается с помощью кнопки на пульте управления. Затем на основе рассчитанной средней температуры смеси ( $t_{см}$ ) система устанавливает режим работы ферментатора. В зависимости от сезона и свойств материала температура загружаемой смеси варьируется в пределах 10-30 °С, в связи с чем

процесс переработки может начинаться как на первом, так и на втором режиме работы.

В процессе переработки температура смеси ( $t_{см}$ ) постепенно возрастает и при превышении 40 °С процесс осуществляется на третьем режиме [14]. Для обеззараживания перерабатываемого материала рекомендуется выдерживать смесь не менее 72 ч при достижении температуры 55 °С (РД-АПК 1.10.15.02-17. Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета. 2020. 167 с.). Из опыта проведенных исследований, в зависимости от типа перерабатываемого материала и установленного режима работы, достижение температуры смеси 55 °С во всем объеме материала занимает 24-72 ч. С учетом необходимости выдерживания 72 ч для обеззараживания смеси весь процесс переработки занимает 96-144 ч (4-6 сут). Именно поэтому система управления основана на мониторинге температуры смеси, поскольку затруднительно точно спрогнозировать, сколько продлится процесс разогрева каждого вида материала. Алгоритм управления предусматривает остановку процесса переработки после 72 ч выдержки с такой температурой либо при нажатии кнопки на пульте управления. Общий вид экспериментального биоферментатора барабанного типа с АСУ представлен на [рисунке 3](#).

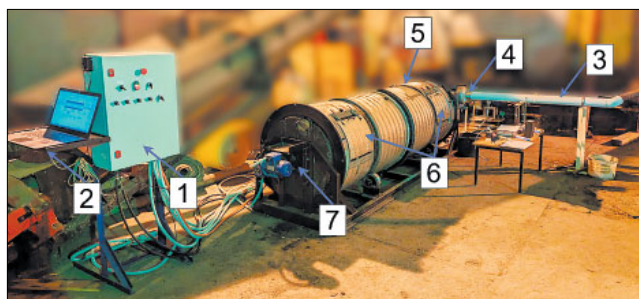


Рис. 3. Биоферментатор барабанного типа с АСУ  
Fig. 3. Drum-type biofermenter equipped with an automated control system

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Система обеспечивает следующие управляющие функции, выполняемые оператором с помощью переключателей и кнопок на шкафу системы управления 1: включение и выключение загрузочного и выгрузного 7 устройств, привода вращения барабана 5, напорного вентилятора аэрации и вытяжного вентилятора 4; режима загрузки (одновременное включение привода вращения барабана и загрузочного устройства) и режима выгрузки (одновременное включение привода вращения барабана и выгрузного устройства); выбор ручного или автоматического режима функционирования; запуск и остановка управляющей программы автоматического процесса переработки; экстренное обесточивание всей установки.

АРМ оператора 2 обеспечивает: изменение режимов работы биоферментатора; мониторинг параметров процесса переработки в виде графиков и числовых значений на экране; сигнализацию об ошибках и достижении контрольных параметров. Система ведет запись и резервное копирование всех данных процесса в энергонезависимой памяти.

Для отбора проб перерабатываемого материала при проведении исследований, на барабане 5 имеются смотровые люки 6, расположенные в загрузочной и выгрузной зонах. Для отвода образующихся воздушных выбросов, к вытяжному вентилятору 4 подключен вытяжной воздуховод 3, оснащенный точкой отбора проб воздушного потока.

Разработанная АСУ успешно испытана в ходе исследований свойств воздушных выбросов (определение влажности и температуры воздушного потока, концентрации в нем аммиака), образующихся при переработке подстилочного помета.

На графике истории значений температуры смеси ([рис. 4](#)), выводимого на экране АРМ оператора, изображены линии тренда температуры смеси для трех зон, загрузочной (оранжевый график), средней (зеленый) и выгрузной (красный график).

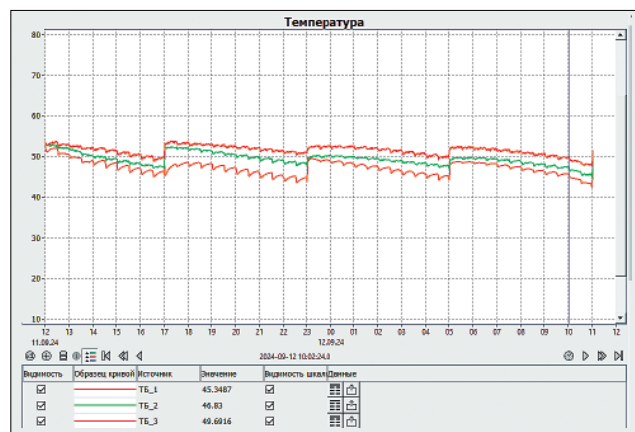


Рис. 4. Окно графика истории значений температуры смеси  
Fig. 4. Window displaying the mixture temperature history graph

Температура между зонами отличается на 2-3 °С, постепенно увеличиваясь от загрузочной зоны к выгрузной. Это связано с тем, что вытяжной вентилятор находится со стороны загрузочной зоны, а также с этой стороны поступает воздух для аэрации смеси. Включения вентилятора аэрации и вращения барабана отслеживаются в виде резких изменений температуры. С интервалом в 30 мин осуществлялось включение напорного вентилятора аэрации, что на графиках фиксируется кратковременным снижением температуры смеси на 1-2 °С. Особенно заметен данный эффект для зоны загрузки. С интервалом в 6 ч осуществлялось вращение барабана, что для всех трех зон отражается в виде резкого скачка температуры на 3-5 °С в результате перемешивания смеси.

Система обеспечивает контроль количества воздуха на аэрацию и откаченного из камеры. Благодаря этому возможно определить количество воздуха, затраченное на аэрацию, и объем образующихся воздушных выбросов.

Применение современных аппаратных компонентов управления позволяет задать алгоритмы с многими управляемыми и контролируемыми параметрами. Все перечисленные возможности позволяют провести исследования по определению оптимальных режимов переработки различных смесей и видов органических отходов.

**Выводы.** Разработанная АСУ обеспечивает выполнение функций автоматизированного контроля параметров переработки и управления режимами биоферментатора барабанного типа: интервал включения вентилятора аэрации, объем подаваемого воздуха в интервал включения вентилятора аэрации, расход воздуха вытяжного вентилятора, интервал вращения барабана, количество оборотов барабана за интервал вращения.

Система построена по классической трехуровневой структуре, аппаратная и программная составляющие выполнены на общепромышленных комплектующих. АРМ оператора обеспечивает оперативное управление режимами работы биоферментатора и мониторинг за параметрами технологического процесса. Датчики температуры смеси, датчики перепада давления и оптический бесконтактный датчик количества оборотов барабана позволяют реализовать автоматизированный алгоритм управления процессом с учетом фазы ферментации смеси.

Предлагаемая система позволит провести углубленные исследования влияния режимов работы и алгоритмов управления на процессы в биоферментаторе барабанного типа для уточнения моделей биотермической реакции, интеллектуализированных алгоритмов управления, что обеспечит сокращение времени переработки, сохранение возможно большего количества питательных элементов и минимальный объем образующихся выбросов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лобачевский Я.П., Дорохов А.С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. N15(4). С. 6-10. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
2. Корнюшкин Д.А., Крылов А.А. Задачи совершенствования современных автоматизированных систем управления технологическими процессами // *Инженерный вестник Дона*. 2023. N3(99). С. 225-232. EDN: NROGYP.
3. Измайлов А.Ю., Хорошенков В.К., Колесникова В.А. и др. Средства автоматизации для управления сельскохозяйственной техникой // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N3. С. 3-9. DOI: 10.22314/2073-7599-2017-3-39.
4. Кузнецов П.А., Ковалев И.В. Надежность АСУ ТП с учетом ее функциональности // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2014. N10. С. 316-317. EDN: TAQFZT.
5. Шалавина Е.В., Васильев Э.В., Уваров Р.А. Методы экологически безопасного использования навоза и помета фермерскими хозяйствами в Ленинградской области // *АгроЭкоИнженерия*. 2021. N3(108). С. 128-140. DOI: 10.24412/2713-2641-2021-3108-128-140.
6. Горбенко А.Д., Каплан М.А., Севостьянова Е.П. и др. Обзор активных методов биологической переработки органических отходов // *Земледелие*. 2023. N3. С. 36-40. DOI: 10.24412/0044-3913-2023-3-36-40.
7. Балабина И.П., Проценко Е.П., Алферова Е.Ю. и др. Утилизация органических отходов от сахарной промышленности компостированием // *Экология урбанизированных территорий*. 2019. N4. С. 27-33. DOI: 10.24411/1816-1863-2018-14027.
8. Романов А.С. Определение теплового режима работы биоферментатора камерного типа // *АгроЭкоИнженерия*. 2024. N2(119). С. 82-92. DOI: 10.24412/2713-2641-2024-2119-82-9.
9. Пиотровский Д.Л., Посмитная Л.А., Дружинина К.В., Дружинина У.В. Математическая модель системы вентиляции с переменным расходом воздуха вдоль вертикальной оси реактора в процессе компостирования // *Научный журнал КубГАУ*. 2016. N121(07). С. 1887-1896. DOI: 10.21515/1990-4665-121-119.
10. Васильев Э.В., Казанцев И.Н. Анализ методов очистки выбросов загрязняющих веществ, образуемых в процессе биоферментации // *АгроЭкоИнженерия*. 2021. N4(109). С. 106-117. DOI: 10.24412/2713-2641-2021-4109-106-116.
11. Колдин М.С., Криволапов И.П. Определение теплофизических характеристик компостируемого материала в процессе биоферментации // *Наука и Образование*. 2022. N5 (1). EDN: BNYDEL.
12. Теучеж А.А., Смирнова Д.Г. Микробиологические, биохимические и технологические основы использования отходов животноводства // *Экологический Вестник Северного Кавказа*. 2017. N13 (2). С. 60-66. EDN: YQYFEB.
13. Лобачевский Я.П., Федотов А.В., Григорьев В.С., Ценч Ю.С. Энергетический потенциал продуктов деградации органосодержащих отходов АПК при их переработке в сверхкритической водной среде // *Вестник аграрной науки Дона*. 2018. N4(44). С. 5-11.
14. Гурьянов Д.В., Хмыров В.Д., Куденко В.Б., Хатунцев П.Ю. Аэрационный биореактор - обеззараживатель органической массы // *Вестник Мичуринского государственного аграрного университета*. 2017. N2. С. 109-113. EDN: ZEFUOB.

## REFERENCES

1. Lobachevskiy Ya.P., Dorokhov A.S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. N15(4). 6-10 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
2. Korniyushkin D.A., Krylov A.A. Challenges for improving modern automated process control systems. *Engineering Bulletin of Don*. 2023. N3(99). 225-232 (In Russian). EDN: NROGYP.
3. Izmaylov A.Yu., Khoroshenkov V.K., Kolesnikova V.A. et al. Automation facilities for agricultural machinery control. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017. N3. 3-9 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2017-3-39.
4. Kuznetsov P.A., Kovalev I.V. Reliability of ACS taking into account its functionality. *Actual problems of aviation and cosmonautics*. 2014. N10. 316-317. (In Russian). EDN: TAQFZT.
5. Shalavina E.V., Vasilev E.V., Uvarov R.A. Methods for environmentally safe use of animal/poultry manure on private farms in the Leningrad region. *AgroEcoEngineering*. 2021. N3 (108). 128-140 (In Russian). DOI: 10.24412/2713-2641-2021-3108-128-140.
6. Gorbenko A.D., Kaplan M.A., Sevost'janova E.P. et al. Review of active methods of biological processing of organic waste. *Zemledelie*. 2023. N3. 36-40 (In Russian). DOI: 10.24412/0044-3913-2023-3-36-40.
7. Balabina I.P., Protsenko E.P., Alferova E.Yu. et al. Disposal of organic waste from sugar industry by composting. *Ecology of Urban Areas*. 2019. N4. 27-33 (In Russian). DOI: 10.24411/1816-1863-2018-14027.
8. Romanov A.S. Determining the thermal operating mode of a chamber fermenter. *AgroEcoEngineering*. 2024. N2(119). 82-92 (In Russian). DOI: 10.24412/2713-2641-2024-2119-82-92.
9. Piotrovskiy D.L., Posmitnaja L.A., Druzhinina K.V., Druzhinina U.V. Mathematical model of a ventilation system with variable air flow along the vertical axis of the reactor in the composting process. *Scientific Journal of KubGAU*. 2016. N121. 1887-1896 (In Russian). DOI: 10.21515/1990-4665-121-119.
10. Vasilev E.V., Kazantsev I.N. Review of cleaning methods of pollutant emissions generated during fermentation. *AgroEcoEngineering*. 2021. N4(109). 106-117 (In Russian). DOI: 10.24412/2713-2641-2021-4109-106-116.
11. Koldin M.S., Krivolapov I.P. Determination of thermo-physical characteristics of composted material in the process of biofermentation. *Science and Education*. 2022. N5 (1) (In Russian). EDN: BNYDEL.
12. Teuchezh A.A., Smirnova D.G. Microbiological, biochemical and technological bases of use of animal wastes. *Ecological Bulletin of the North Caucasus*. 2017. N13(2). 60-66 (In Russian). EDN: YQYFEB.
13. Lobachevskiy Ya.P., Fedotov A.V., Grigorjev V.S., Tsench Yu.S. Energy potential of degradation products of organic wastes of agroindustrial complex during their processing in supercritical water environment. *Don Agrarian Science Bulletin*. 2018. N4(44). 5-11 (In Russian).
14. Guryanov D.V., Khmyrov V.D., Kudenko V. B., Khatuntsev P.Yu. . Aeration bioreactor as organic matter disinfectant. *Bulletin of Michurinsk State Agrarian University*. 2017. N2. 109-113 (In Russian). EDN: ZEFUOB.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

## Заявленный вклад соавторов:

Брюханов А.Ю. – научное руководство, формулирование основных целей и задач теоретических исследований, доработка текста;  
Васильев Э.В. – определение методологии исследования, критический анализ и доработка решения, формирование общих выводов, итоговая переработка статьи;  
Егоров С.А. – сбор и анализ материалов по теме исследования, разработка и испытание автоматизированной системы управления, составление начального варианта статьи.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## Coauthors' contribution:

Briukhanov A.Yu. – scientific supervision, formulation of the main goals and objectives for the theoretical research, and refinement of the manuscript;  
Vasilev E.V. – definition of the research methodology, critical analysis and refinement of the solution, development of general conclusions, final revision of the manuscript;  
Egorov S.A. – collection and analysis of research materials, development and testing of the automated control system, and preparation of the initial draft of the manuscript.

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

03.04.2025

06.05.2025

EDN: RHTRSZ

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-11-18

Научная статья  
УДК 631.331.54

## Эколого-эргономические аспекты функционирования технологий возделывания подсолнечника

Мухтар Ахмиевич Керимов,  
доктор технических наук, профессор,  
e-mail: martan-rs@yandex.ru;

Виктор Иванович Ветушко,  
старший преподаватель,  
e-mail: masterkms@mail.ru

Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, Санкт-Петербург, Пушкин, Российская Федерация

**Реферат.** Технология возделывания гибридных семян подсолнечника формализована в виде биотехнической динамической системы «оператор-машина-среда». Эффективность ее функционирования зависит от различных факторов, основными из них являются квалификация операторов-машинистов, технический уровень машин, производственная и внешняя среда. (*Цель исследования*) Повышение эффективности технологий производства гибридных семян подсолнечника за счет разработки и обоснования безопасных научно-технических решений. (*Материалы и методы*) Установили, что указанная система является вероятностной и ее состояние можно описать моделью. В качестве аргументов функции выбраны факторы, которые формируют обстоятельства, оказывающие на систему позитивное, нейтральное и негативное воздействия. Констатировали, что для организации оптимального функционирования системы необходима рациональная дифференциация энергетических, материальных и информационных потоков по подсистемам и целесообразная увязка их между собой. (*Результаты и обсуждение*) Доказали, что достижение поставленной цели обеспечивается реализацией главных системотехнических задач: анализа – выбор основных параметров биотехнической системы, характеристик внешней среды, изменяющихся случайным (в вероятностно-статистическом смысле) образом; синтеза – обоснованием оптимальной схемы управления системой. (*Выводы*) Технологическая надежность биотехнической системы как качественная мера характеризует приспособленность ее к выполнению предписанных функций с учетом технико-экономических показателей, эколого-эргономических требований и временного аспекта. Эргономические требования к выбору структуры и обоснованию параметров системы должны учитывать травмоопасные факторы, влияющие на безопасность технологий производства гибридных семян подсолнечника. Пересечение во времени и пространстве обстоятельств предтравматической ситуации и опасного действия операторов приводит к травмам, появление которых характеризуется как функция. Предложен комплексный показатель – критерий травмоопасности, являющийся функцией травмирующих факторов: запыленности рабочей зоны; температуры окружающей среды; технического уровня машинно-тракторного агрегата. Разработана модель прогноза числа пострадавших операторов и обоснованы направления профилактики травматизма при возделывании гибридных семян подсолнечника. Агротехнологическое приложение разработанной модели позволяет обеспечивать снижение травматизма на 12-15 процентов, а в перспективе перейти на безопасные технологии возделывания гибридных семян подсолнечника.

**Ключевые слова:** подсолнечник, гибридные семена, технология, функционирование, биотехническая система, травматизм, прогнозная модель.

■ **Для цитирования:** Керимов М.А., Ветушко В.И. Эколого-эргономические аспекты функционирования технологий возделывания подсолнечника // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №2. С. 11-18. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-11-18. EDN: RHTRSZ.

Scientific article

## Ecological and Ergonomic Aspects of Operating Hybrid Sunflower Cultivation Technologies

Mukhtar A. Kerimov,  
Dr.Sc.(Eng.), professor,  
e-mail: martan-rs@yandex.ru;

Viktor I. Vetushko,  
senior lecturer,  
e-mail: masterkms@mail.ru

St. Petersburg State Agrarian University, Pushkin, St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract.** The technology for cultivating hybrid sunflower seeds is formalized as a biotechnical dynamic system structured around the «operator–machine–environment» triad. The efficiency of this system depends on multiple factors, primarily the qualification

level of machine operators, the technical advancement of the machinery, and the conditions of both the production and external environments. (*Research purpose*) To enhance the efficiency of hybrid sunflower seed production technologies by developing and validating safe scientific and technical solutions. (*Materials and methods*) The system is characterized as probabilistic, with its state described by a mathematical model. The model's input variables represent factors exerting positive, neutral, or negative impacts on the system. It is established that achieving optimal system performance requires the rational distribution and effective coordination of energy, material, and information flows across its subsystems. (*Results and discussion*) The study demonstrates that the research objective is achieved through two core systems engineering tasks: analysis, which involves identifying key parameters of the biotechnical system and environmental variables that exhibit probabilistic-statistical variability; and synthesis, which involves justifying an optimal control scheme for system operation. (*Conclusions*) The technological reliability of the biotechnical system, as a qualitative metric, reflects its capacity to perform designated functions while accounting for technical and economic indicators, ecological and ergonomic requirements, and time-related factors. Ergonomic requirements related to system design and parameter selection must take into consideration injury-inducing factors that affect the safety of hybrid sunflower seed production technologies. The convergence of pre-injury conditions and hazardous operator actions in time and space leads to injury, the occurrence of which can be mathematically modeled as a function. A comprehensive indicator – the injury risk criterion – is proposed and modeled as a function of harmful factors, including workplace dust concentration, ambient temperature, and the technical condition of the machine-tractor unit. A predictive model has been developed to estimate the number of potential injuries, and corresponding preventive measures have been substantiated. The agrotechnological application of the proposed model enables a 12-15% reduction in injury rates and facilitates the transition to safer cultivation technologies for hybrid sunflower seed production.

**Keywords:** sunflower, hybrid seeds, technology, functioning, biotechnical system, injury risk, predictive model

■ **For citation:** Kerimov M.A., Vetushko V.I. Ecological and ergonomic aspects of operating hybrid sunflower cultivation technologies. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N2. 11-18. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-11-18. EDN: RHTRSZ.

Повышение эффективности технологий возделывания гибридных семян подсолнечника является актуальной задачей. По конструктивному содержанию и инженерному обеспечению указанные технологии относятся к машинным, а условия выполнения технологических операций носят случайный (в вероятностно-статическом смысле) характер. Стохастичность условий функционирования определяет в значительной степени эффективность технологий в агроинженерии, а также влияет на уровень безопасности производственного процесса в целом [1].

**Цель исследования:** разработка и обоснование методики принятия оптимальных решений при реализации технологий возделывания гибридных семян подсолнечника на основе исследования производственного процесса как агробиотехнологической системы «оператор-машина-среда» («О-М-С»). Объект исследования – технология возделывания гибридных семян масличных культур, формализованная в виде вероятностной динамической системы.

Предмет исследования – проблемные ситуации и закономерности формирования безопасных условий функционирования агробиотехнологической системы «оператор-машина-среда».

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Для постановки задачи наиболее применимой является системная методология, а технология возделывания гибридных семян подсолнечника целесообразно рассматривать в виде агробиотехнологической системы «опера-

тор-машина-среда» [2]. Агробиотехнологическая система состоит из трех подсистем: оператор, технологическая машина и внешняя среда.

Адаптивные способности оператора не безграничны, и его чувствительность к стрессовым ситуациям определяется уровнем квалификации. Время реакции оператора – величина случайная, имеющая модальное распределение и обладающая большой дисперсией. В терминах теории управления реакция оператора представляет собой переходный процесс, количественные закономерности которого изучены еще не до конца [3]. Указанная подсистема является вероятностной.

Технологические параметры машин в производственных условиях изменяются случайным образом. Чем дальше характеристики машинной части от оптимальных, тем хуже оператор справляется со своими функциями [4]. Условия функционирования машин, в свою очередь, характеризуются неопределенностью факторов внешней среды. Для установления закономерностей изменения условий и учета их в расчетных схемах необходимо использовать основные положения теории вероятностей. Таким образом, две другие подсистемы также являются вероятностными. Следовательно, агробиотехнологическая система «О-М-С» в целом является вероятностной и ее исследование целесообразно проводить на основе методов статистической динамики.

Система функционирует в условиях влияния на ее эффективность многочисленных факторов про-

изводственного, технологического, технического и организационного характера [5]. Для количественной оценки этих факторов наиболее применима динамическая модель, которая в терминах «вход-выход» выглядит следующим образом (рис. 1).

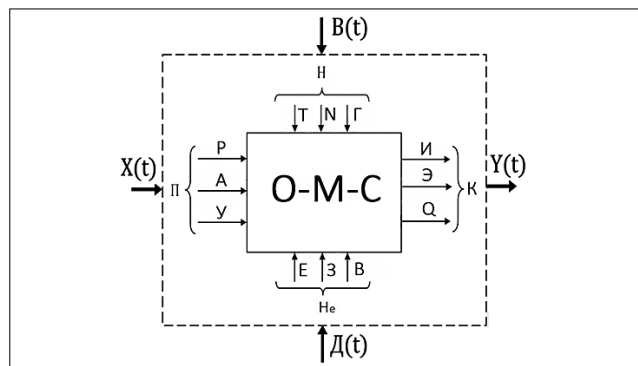


Рис. 1. Модель функционирования технологии производства семян подсолнечника в терминах «вход-выход»

Fig. 1. Input-output model of sunflower seed production technology

Принятые обозначения:

$X(t)$  – вектор-функция входных переменных;

$V(t)$  – вектор-функция контролируемых параметров;

$D(t)$  – вектор-функция неконтролируемых параметров;

$Y(t)$  – вектор-функция выходных параметров;

П – позитивные воздействия (Р – конструктивная рациональность машины; А – агротехнические требования к сельскохозяйственной машине; У – уровень квалификации оператора);

Н – нейтральные воздействия (Т – технологические параметры машины; N – режимные параметры машины; Γ – эргономические показатели машины);

Не – негативные воздействия (Е – температура наружного воздуха; З – запыленность рабочей зоны; В – вибрации, оказывающие воздействие на оператора);

К – комплексный показатель, характеризующий эффективность функционирования машины (И – энергоёмкость, Э – экологичность, Q – производительность машины).

С точки зрения обеспечения безопасности реализуемой технологии наиболее значимыми и требующими дальнейшего исследования являются такие травмоопасные факторы и параметры, как показатели качества технологической машины, температура наружного воздуха, его запыленность, загазованность, влажность и др. [6]. Каждый из перечисленных факторов характеризуется определенным влиянием на организм операторов (семеноводов), занятых в производственном цикле [7]. Проведенные исследования показали тесную кор-

реляцию между значениями температуры наружного воздуха и его запыленностью. Поэтому при разработке расчетной схемы показатель температуры не учитывается [8].

Для определения мероприятий по оптимизации модели функционирования системы «О-М-С» необходимо выполнить ее диагностический анализ [9]. С этой целью осуществляют отбор травмирующих факторов, влияющих на функционирование системы. Так как количество факторов велико, то их отбор следует проводить в два этапа: на первом этапе с использованием метода априорного ранжирования, на втором – путем однофакторных экспериментов с дисперсионным анализом их результатов [10]. Такое исследование, проводимое на предварительной стадии, позволяет осуществлять сбор информации о системе на основе опроса работников в виде анкеты факторов [11].

Собранная информация анализируется, и степень совпадения мнений экспертов оценивается коэффициентом конкордации  $W$  по критерию  $\lambda^2$ . При  $\lambda^2_{\text{экс}} > \lambda^2_{\text{табл}}$  степень согласия не вызывает сомнения. Величина  $\lambda^2_{\text{экс}}$  определяется по формуле [12]:

$$\lambda^2_{\text{экс}} = n(k-1)W \quad (1)$$

где  $n$  – количество опрошенных (экспертов);  $k$  – количество факторов.

Величина  $\lambda^2_{\text{табл}}$  при доверительном интервале  $P = 0,90-0,99$  и число степеней свободы  $f = (k-1)$  находятся по таблицам [13].

Коэффициент конкордации вычисляется по формуле

$$W = \frac{12 \cdot S}{m^2(k^3 - 1)} \quad (2)$$

где  $S$  – сумма квадратов отклонений, определяемая по формуле

$$S = \sum_{i=1}^k \left( \sum_{j=1}^m a_{ij} - L \right)^2, \quad (3)$$

где  $a_{ij}$  – ранг (порядковый номер) при опросе  $i$ -го фактора  $j$ -го специалиста;  $L$  – среднее значение сумм ранга по каждому фактору, рассчитываемое по формуле

$$L = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m a_{ij}}{k}. \quad (4)$$

Коэффициент конкордации изменяется в интервале  $0 \leq W \leq 1$ .

При  $W = 0$  согласия во мнениях опрошенных нет, при  $W = 1$  – полное согласие опрошенных относительно порядка убывания влияния факторов [14].

При выполнении неравенства  $\lambda^2_{\text{экс}} > \lambda^2_{\text{табл}}$  и соответствующем числе степеней свободы строится ди-

аграмма ранга факторов (гистограмма), характеризующая коллективное мнение опрошенных: по оси абсцисс – факторы в порядке убывания их ранга, по оси ординат – сумма рангов по соответствующему фактору [15].

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Проведенный анализ условий функционирования технологических процессов возделывания гибридных семян подсолнечника позволяет сформулировать единый критерий, являющийся функцией травмоопасных факторов. В качестве такого критерия предложен комплексный показатель травмоопасности  $K_{тр}$ , составляющими которого выбраны запыленность рабочей зоны и технические характеристики машинно-тракторного агрегата.

В формализованном виде показатель травмоопасности запишется:

$$K_{тр} = F[X, 3], \quad (5)$$

где  $K_{тр}$  – показатель травмоопасности системы;  $X$  – техническая характеристика машинно-тракторного агрегата, (кВт, т); 3 – запыленность рабочей зоны, %.

Анализ выражения (5) показывает, что чем меньше показатель травмоопасности  $K_{тр}$ , тем больше коэффициент безопасности производственного процесса.

Расчетная схема принятия решений по оценке травмоопасности при функционировании агробиотехнологической системы «О-М-С» представлена на рисунке 2.

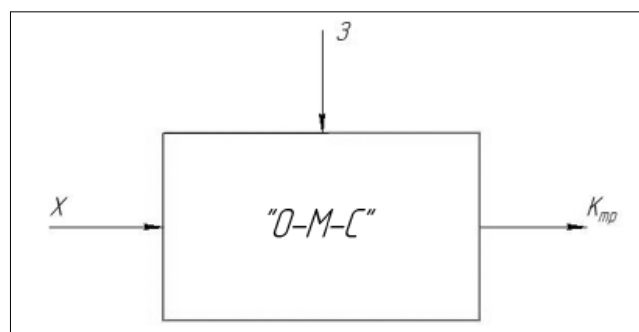


Рис. 2. Расчетная схема к определению травмоопасности агробиотехнологической системы

Fig. 2. Computational diagram for evaluating injury risk in an agrobiotechnological system

Если обозначить вероятность травмирования операторов при реализации конкретной технологии  $P_{без}$ , то справедливо следующее соотношение

$$P_{без} = 1 - P_{K_{тр}}. \quad (6)$$

Экспериментально исследовались условия труда операторов (семеноводов) по травмоопасным воздействиям на различных операциях при работе на агрегатах с тракторами МТЗ-80.1 и МТЗ-82.1.

Запыленность воздуха определяется влажностью почвы, выполняемой технологической операцией, скоростью движения агрегата. Как видно из графика (рис. 3), наибольшая запыленность имеет место на пахоте, посеве яровых и озимых культур, культивации технических культур, бороновании. Пыль при работе зерноуборочных комбайнов с приставками содержит около 85% органических частиц, 68–80% которых меньше 1 мкм; концентрация ее доходит до 200 мг/м<sup>3</sup>. Понижение влажности почвы на 1% сопровождается увеличением содержания пыли в воздухе в 1,5–1,8 раза.

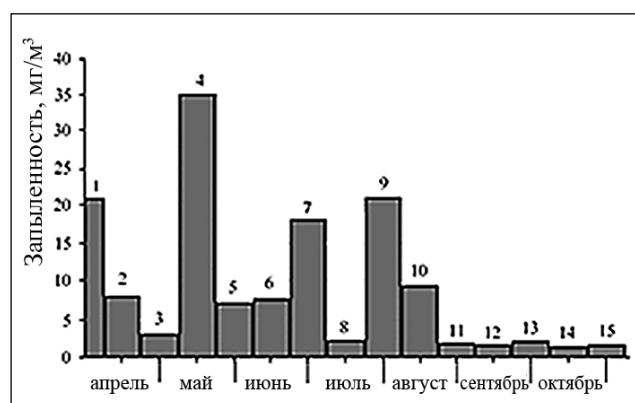


Рис. 3. Динамика запыленности воздуха при выполнении технологических операций машинно-тракторными агрегатами: 1 – боронование зяби; 2 – посев ранних зерновых; 3 – весенняя вспашка; 4 – боронование; 5 – посев масличных культур; 6 – посев трав; 7 – первая культивация масличных культур; 8 и 11 – транспортные работы; 9 – вторая культивация масличных культур; 10 – культивация бахчевых культур; 12 – внутрихозяйственные работы; 13 – уборка и скирдование соломы; 14 – уборка масличных культур на силос; 15 – пахота зяби

Анализ диаграммы, представленной на рисунке 4, позволяет утверждать о линейной зависимости числа пострадавших механизаторов от травмоопасных факторов.

В связи с важностью вопроса и необходимостью поиска путей профилактики производственного травматизма представляет интерес прогноз их числа на ближайшую перспективу (4–5 лет). Для формирования статистической выборки с целью построения прогнозной модели использованы показатели за период 2014–2023 гг.

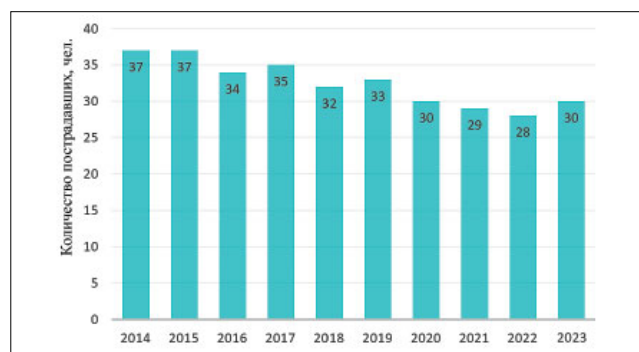


Рис. 4. Динамика пострадавших механизаторов от воздействия травмоопасных факторов за период 2014-2023 гг.

Fig. 4. Trends in machine operator injuries caused by hazardous factors during 2014-2023

При моделировании ретроспективный период должен составлять 7-10 лет, а глубина прогноза – не превышать половины длины ретроспективного периода. Эти сведения представлены на рисунке 5.

Пользуясь этими данными, обосновываем модели анализа и прогноза параметров числа пострадавших от травмоопасных факторов в 2014-2023 гг. (модель анализа на базовый период) и с 2024 по 2028 г. (модель прогноза со средним, минимальным и максимальным значениями). В качестве базового (исходного) выбираем любой предшествующий анализу год, к примеру, 2008 г.; годами анализа (база прогноза) являются 2014-2023 гг.; годами прогноза являются 2024-2028 гг.

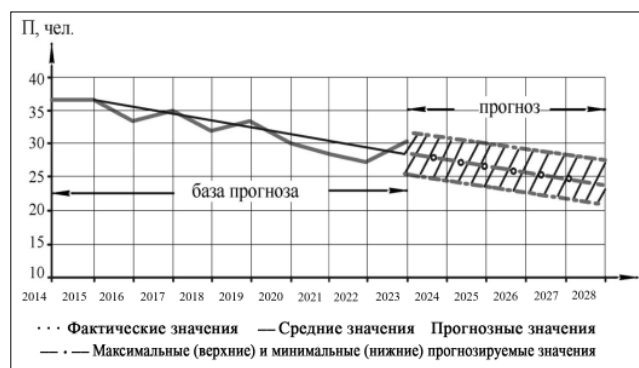


Рис. 5. Модель прогноза числа пострадавших операторов (семеноводов) от травмирующих факторов

Fig. 5. Forecast model estimating the number of operator injuries (seed production workers) caused by traumatic factors

Время  $\tau$  от выбранного (исходного 2008 г.) до года анализа ( $\Gamma_n$ ):

$$\begin{aligned}\tau_1 &= \Gamma_1 - \Gamma_n = 2014 - 2008 = 6; \\ \tau_2 &= \Gamma_2 - \Gamma_n = 2015 - 2008 = 7; \\ \tau_3 &= \Gamma_3 - \Gamma_n = 2016 - 2008 = 8; \\ \tau_4 &= \Gamma_4 - \Gamma_n = 2017 - 2008 = 9.\end{aligned}\quad (7)$$

Аналогично:

$$\tau_5 = 10; \tau_6 = 11; \tau_7 = 12; \tau_8 = 13; \tau_9 = 14; \tau_{10} = 15.$$

Математическое ожидание  $m_\tau$  величины  $\tau$  определяется по зависимости:

$$m_\tau = n^{-1} \sum_{i=1}^1 \tau_i, \quad (8)$$

где  $k$  – число лет, за которое ведется анализ (в нашем случае  $k = 10$ ):

$$m_\tau = 1/10 (6+7+8+9+10+11+12+13+14+15) = 105/10 = 10,5.$$

Математическое ожидание  $m_\Pi$  числа пострадавших от травмирующих факторов за годы анализа определяется по зависимости:

$$m_\Pi = \frac{n}{10} \sum_{i=1}^i \Pi = \frac{1}{10} (37 + 37 + 34 + 35 + 32 + 33 + 30 + 29 + 28 + 30) = 32,5. \quad (9)$$

Коэффициент корреляции

$$\vartheta_{\tau\Pi} = n^{-1} \sum_{i=1}^i (\tau_i - m_\tau) (\Pi - m_\Pi) \quad (10)$$

Значение разности  $(\tau_i - m_\tau)$  для условий расчета:

$$(\tau_1 - m_\tau) = 6 - 10,5 = 4,5;$$

$$(\tau_2 - m_\tau) = 7 - 10,5 = -3,5.$$

и далее:  $-2,5; -1,5; -0,5; 0,5; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5$ .

Значение разности:

$$(\Pi_1 - m_\Pi) = (37 - 32,5) = 4,5;$$

$$(\Pi_2 - m_\Pi) = (37 - 32,5) = 4,5.$$

и далее  $1,5; 2,5; -0,5; 0,5; -2,5; -3,5; -4,5; -2,5$ .

Тогда:

$$\vartheta_{\tau\Pi} = 1/10 (-20,25 - 15,75 - 3,75 - 3,75 + 0,25 + 0,25 - 3,75 - 8,75 - 15,75 - 11,25) = -8,25$$

Находим дисперсии  $D_\tau$  и  $D_\Pi$  параметров  $\tau_i$  и  $\Pi$ .

Дисперсия параметра времени  $\tau_i$ :

$$D_\tau = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^i (\tau_i - n_\tau)^2. \quad (11)$$

С учетом полученных значений:

$$D_\tau = 1/(10-1) (20,25+12,25+6,25+2,25+0,25+0,25+0,25+2,25+6,25+12,25+20,25) = 82,5/9 = 9,17.$$

Дисперсия пострадавших от травмирующих факторов по аналогичной зависимости:

$$D_\Pi = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^i (\Pi - n_\Pi)^2. \quad (12)$$

Для рассматриваемых условий

$$D_\Pi = 1/9 (20,25+20,25+2,25+6,25+0,25+0,25+6,25+12,25+20,25+6,25) = 10,5.$$

Фактическое значение числа пострадавших операторов

$$\Pi = m_{\Pi} + \Delta_{\Pi} \quad (13)$$

где  $\Delta_{\Pi}$  – отклонение фактического значения  $\Pi$  (реализация) от математического ожидания  $m_{\Pi}$  (приближенное среднее значение).

Динамика пострадавших семеноводов от травмирующих факторов представлена на *рисунке 5*.

На основе метода линейной регрессии и с учетом изменения фактических значений числа пострадавших

$$m_{\Pi} = a\tau_1 + b \quad (14)$$

Таким образом, динамику числа пострадавших операторов (семеноводов) от травмирующих факторов можно описать уравнением линейной регрессии, зная значение коэффициентов  $a$  и  $b$ , которые определяются по зависимостям:

$$a = \frac{\vartheta_{\Pi\tau}}{\Delta_{\tau}} \quad (15)$$

$$b = m_{\Pi} - a\tau_1 \quad (16)$$

Для наших условий

$$a = (-8,25)/9,17 = -0,9;$$

$$b = 32,5 - (-0,9 \cdot 10,5) = 41,95.$$

Таким образом  $\Pi = a\tau_1 + b + \Delta_{\Pi}$ . Эта зависимость является расчетной, по которой осуществляется анализ и прогнозирование значения числа пострадавших операторов (семеноводов) и путей профилактики. При прогнозировании полагают стабильность уровня профилактики от травмирующих факторов и сохранения его в пределах прогнозного периода таким, как в период анализа, что близко к реальности.

Прогнозируя число пострадавших, полагаем, что величина  $\Delta_{\Pi}$  распределена по нормальному закону и все ее реализации с вероятностью 0,99 находятся в интервале  $\varepsilon = \pm 2,58\delta_{\Delta_{\Pi}}$ , (где  $\delta_{\Delta_{\Pi}}$  – среднеквадратическое отклонение величины). Значение  $\delta_{\Delta_{\Pi}}$  находится по формуле:

$$\delta_{\Delta_{\Pi}} = \sqrt{\Delta_{\Pi} - a^2\Delta_{\tau}} = \sqrt{10,5 - 7,42} = 1,75.$$

Тогда

$$\varepsilon = \pm 2,58 \cdot 1,75 = \pm 4,51.$$

Следовательно, в наших условиях уравнение прогноза имеет вид:

$$\Pi = m_{\Pi} \pm \varepsilon = a\tau_i + b \pm \varepsilon \quad (17)$$

Как видно, прогнозируемые значения  $\Pi$  отличаются от среднего на величину  $\pm \varepsilon$ . С большой долей вероятности можно утверждать, что прогнозируемые значения  $\Pi$  будут находиться в диапазоне от  $\Pi_{\min}$  до  $\Pi_{\max}$ :

$$\Pi_{\min} = a\tau_i + b - \varepsilon; \Pi_{\max} = a\tau_i + b + \varepsilon \quad (18)$$

При этом значения числа пострадавших от травмирующих факторов будет сокращаться на 1 человека в год, или на 4%.

### Выводы

Технологическая надежность агробиотехнологической системы как качественная мера характеризует приспособленность ее к выполнению предписанных функций с учетом технико-экономических показателей, эколого-эргономических требований и временного аспекта.

Эргономические требования к выбору структуры и обоснованию параметров системы должны учитывать травмоопасные факторы, влияющие на безопасность технологий производства гибридных семян подсолнечника.

Пересечение во времени и пространстве обстоятельств предтравматической ситуации (ПС) и опасного действия (ОД) операторов приводит к травмам, появление которых характеризуется как функция  $T = f(\text{ПС}, \text{ОД})$ .

Предложен комплексный показатель – критерий травмоопасности  $K_{\text{тр}}$ , являющийся функцией травмирующих факторов: запыленности рабочей зоны; температуры окружающей среды; технического уровня машинно-тракторного агрегата. В формализованном виде  $K_{\text{тр}} = F[X, T, 3]$ .

Разработана модель прогноза числа пострадавших операторов (семеноводов) и обоснованы направления профилактики травматизма при возделывании гибридных семян подсолнечника. Агро-технологическое приложение разработанной модели позволяет обеспечивать снижение травматизма на 12-15%, а в перспективе перейти на безопасные технологии возделывания гибридов подсолнечника.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Керимов М.А., Ветушко В.И. Повышение эффективности и безопасности функционирования технологий производства семян технических культур // *Известия Международной академии аграрного образования*. 2023. №66. С. 44-49. EDN: SCKMEP.
2. Моисеев С.А., Рябкин Е.А., Камалихин В.Е., Каргин В.И. Совершенствование технологии возделывания подсолнечника // *Промышленность и сельское хозяйство*. 2021. №3 (32). С. 25-33.
3. Artemyev A.A., Guryanov A.M., Kargin V.I., Zaharkina R.A. The use of mineral fertilizers in the cultivation of spring rape: features and economic assessment. *Annals of Agri Bio Research*. 2019. Vol. 24. N2. 191-195. EDN: GDFPLJ.

4. Nenko N.I., Neshchadim N.N. Prospects for sunflower cultivation in the Krasnodar Region with the use of plant growth regulator. *Helia*. 2016. Vol. 39. N65. 197-211. DOI: 10.1515/helia-2016-0018.
5. Белова Т.И., Шкрабак В.С., Савельев А.П., Агашков Е.М. Проблемы определения дисперсного состава пыли в воздухе рабочей зоны комбикормовых предприятий // Безопасность жизнедеятельности. 2022. N9(261). С. 24-30. EDN: JJVDJH.
6. De Andrade L.C., Andreazza R., De Oliveira Camargo F.A. Cultivation of sorghum and sunflower in soils with amendment of sludge from industrial landfill. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 2019. Vol. 8. N2. 119-130. DOI: 10.1007/s40093-018-0236-4.
7. Nizamov R.M., Safiollin F.N., Khismatullin M.M. et al. Modern biological products and growth stimulators in the technology of cultivation of sunflower for oilseeds. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*. 2019. Vol. 10. N1. 341-347. EDN: JMOYIA.
8. Belova T.I., Titenok A.V., Bezik V.A. et al. Theoretical rationale of adopting dust removal systems in workplaces of reception points at mixed feed milling plants. *Natural Volatiles and Essential Oils*. 2021. Vol. 8. N4. 7840-7853. EDN: MCQFTJ.
9. Vad A., Szabó A., Basal O., Veres S. Yield of sweet corn and sunflower as affected by different cultivation methods and fertilisation schemes. *Plant, Soil and Environment*. 2023. Vol. 69. N10. 480-485. DOI: 10.17221/292/2023-pse.
10. Agashkov E., Terekhov D., Loboda O., Belova T. Analysis of disperse composition of the dust in air of working zone of feed mills. *IOP: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 913. 052064. DOI: 10.1088/1757-899X/913/5/052064.
11. Дукеева А.К. Урожайность подсолнечника в зависимости от приемов возделывания // Наука и образование. 2023. N1-3(70). С. 116-124. DOI: 10.52578/2305-9397-2023-1-3-116-124.
12. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И., Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С. Цифровые технологии в почвообработке // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. N1(30). С. 191-197. EDN: ZAWQJF.
13. Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Методологические аспекты стандартизации машинных технологий производства продукции растениеводства // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019. N1(34). 61-67. EDN: WDXYHY.
14. Мазитов Н.К., Сахапов Р.Л., Шогенов Ю.Х. и др. Конкурентоспособный комплекс техники и технологии для производства зерна и кормов // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2019. Т. 20. N3. С. 299-308. DOI: 10.30766/2072-9081.2019.20.3.299-308.
15. Geraskin M.M., Sorokina O.A., Zakharkina R.A. et al. Agricultural models based on the rational use of land energy. *IOP: Earth and Environmental Science Series*. 2021. 012060. DOI: 10.1088/1755-1315/867/1/012060.

## REFERENCES

1. Kerimov M.A., Vetushko V.I. Improving the efficiency and safety of the functioning of technologies for the production of seeds of industrial crops. *Izvestia International Academy of Agricultural Education*. 2023. N66. 44-49 (In Russian). EDN SCKMEP.
2. Moiseev S.A., Ryabkin E.A., Kamalikhin V.Ye., Kargin V.I. Improvement of sunflower cultivation technology. *Industry and Agriculture*. 2021. N3 (32). 25-33 (In Russian).
3. Artemyev A.A., Guryanov A.M., Kargin V.I., Zakharkina R.A. The use of mineral fertilizers in the cultivation of spring rape: features and economic assessment. *Annals of Agri Bio Research*. 2019. Vol. 24. N2. 191-195 (In English). EDN: GDFPLJ.
4. Nenko N.I., Neshchadim N.N. Prospects for sunflower cultivation in the krasnodar region with the use of plant growth regulator. *Helia*. 2016. Vol. 39. N65. 197-211 (In English). DOI: 10.1515/helia-2016-0018.
5. Belova T.I., Shkrabak V.S., Savel'yev A.P., Agashkov Ye.M. Problems of assessing the dispersed composition of dusts in the air of the working area of feed mills. *Life Safety*. 2022. N9(261). 24-30 (In English). EDN: JJVDJH.
6. De Andrade L.C., Andreazza R., De Oliveira Camargo F.A. Cultivation of sorghum and sunflower in soils with amendment of sludge from industrial landfill. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 2019. Vol. 8. N2. 119-130 (In English). DOI: 10.1007/s40093-018-0236-4.
7. Nizamov R.M., Safiollin F.N., Khismatullin M.M. et al. Modern biological products and growth stimulators in the technology of cultivation of sunflower for oilseeds. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research*. 2019. Vol. 10. N1. 341-347. EDN: JMOYIA.
8. Belova T.I., Titenok A.V., Bezik V.A. et al. Theoretical rationale of adopting dust removal systems in workplaces of reception points at mixed feed milling plants. *Natural Volatiles and Essential Oils*. 2021. Vol. 8. N4. 7840-7853 (In English). EDN: MCQFTJ.
9. Vad A., Szabó A., Basal O., Veres S. Yield of sweet corn and sunflower as affected by different cultivation methods and fertilisation schemes. *Plant, Soil and Environment*. 2023. Vol. 69. N10. 480-485 (In English). DOI: 10.17221/292/2023-pse.
10. Agashkov E., Terekhov D., Loboda O., Belova T. Analysis of disperse composition of the dust in air of working zone of feed mills. *IOP: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 913. 052064 (In English). DOI: 10.1088/1757-899X/913/5/052064.
11. Dukeyeva A.K. Sunflower yield depending on cultivation

- techniques. *Science and Education*. 2023. N1-3(70). 116-124 (In Russian). DOI: 10.52578/2305-9397-2023-1-3-116-124.
12. Lobachevsky Ya.P., Starovoitov S.I., Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S. Digital technologies in tilling. *Innovations in agriculture*. 2019. N1(30.) 191-197 (In Russian). EDN: ZAWQJF.
13. Beylis V.M., Tsench Yu.S. Methodological aspects of standardization of machine technologies for crop production. *Electrical engineering and electrical equipment in agriculture*. 2019. N1(34). 61-67 (In Russian). EDN: WDXYHY.
14. Mazitov N.K., Sakhapov R.L., Shogenov Yu.Kh. et al. Competitive complex of machinery and technologies for the production of grain and feed. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2019. T. 20. N3. 299-308. DOI: 10.30766/2072-9081.2019.20.3.299-308.
15. Geraskin M.M., Sorokina O.A., Zakharkina R.A. et al. Agricultural models based on the rational use of land energy. *IOP: Earth and Environmental Science Series*. 2021. 012060 (In English). DOI:10.1088/1755-1315/867/1/012060.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Заявленный вклад соавторов:

Керимов М.А. – научное руководство, формулирование основных направлений и разработка концептуальных положений исследования, доработка текста, формирование общих выводов;

Ветущко В.И. – литературный анализ, оценка технологий возделывания гибридных семян подсолнечника с учетом природно-производственных условий, проведение экспериментальных исследований, обработка результатов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Coauthors' contribution:

Kerimov M.A. – scientific supervision, formulation of the main research directions and development of the study's conceptual provisions framework, final revision of the manuscript, and formulation of general conclusions;

Vetushko V.I. – literary review, evaluation of hybrid sunflower seed cultivation technologies in relation to natural and production conditions, experimental research, and data 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

02.04.2025  
22.05.2025

EDN: SKWTMC

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-19-25



Научная статья

УДК: 631.354



## Модифицированный SLAM для навигации сельскохозяйственных роботов

**Николай Валерьевич Гапон<sup>1</sup>,**

научный сотрудник,

e-mail: nikolay-rt@mail.ru;

**Вячеслав Владимирович Воронин<sup>2</sup>,**

кандидат технических наук, доцент,

e-mail: voronin\_sl@mail.ru;

**Дмитрий Владимирович Рудой<sup>1</sup>,**

доктор технических наук,

ведущий научный сотрудник,

e-mail: rudoy.d@gs.donstu.ru;

**Марина Михайловна Жданова<sup>1</sup>,**

научный сотрудник,

e-mail: mpismenskova@mail.ru

<sup>1</sup>Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация;<sup>2</sup>Научно-производственный комплекс «Технологический центр», г. Зеленоград, Российская Федерация;

*Исследование выполнено при поддержке гранта в рамках конкурса «Наука-2030».*

**Реферат.** Предложен новый метод реконструкции для восстановления потерянных областей на картах глубины для повышения точности автономной навигации сельскохозяйственных РТК. (Цель исследования) Разработка метода, который устраняет потери данных на картах глубины, улучшая тем самым работу системы одновременной локализации и картографирования (SLAM). (Материалы и методы) Оригинальный метод реконструкции карт глубины включает: вычисление анизотропного градиента; поиск аналогичных блоков на основании нового критерия; объединение найденных блоков с помощью нейросетевой архитектуры, состоящей из кодировщика, слоя слияния и декодера. Метод протестирован на наборе данных *Rosario*, в том числе со сложными сценариями сельского хозяйства. (Результаты и обсуждение) Реконструкция карт глубины показала значительное улучшение качества: средняя ошибка (RMSE) пикового отношения сигнала к шуму (PSNR) и индекса структурного сходства (SSIM) уменьшилась на 20–30% по сравнению с существующими методами. Показано, что предлагаемый метод сохраняет структуру и текстуру восстановленных областей, обеспечивая точную реконструкцию крупных зон с отсутствующими пикселями. Чтобы сравнить производительность SLAM, была выбрана *S-MSCKF*. Количественные результаты абсолютной ошибки траектории (ATE) и среднее значение RMSE оценены с помощью SLAM до и после восстановления карт глубины. Абсолютная ошибка траектории (ATE) снизилась с 0,62 до 0,25 метра, а RMSE – с 0,85 до 0,39 метра. (Выводы) Предлагаемый метод значительно повышает точность работы систем SLAM, особенно в условиях сложных сельских ландшафтов, изменчивого освещения и длительных перемещений. Отмечен потенциал для широкого внедрения метода в системах автономного управления сельскохозяйственной техникой при увеличении надежности и безопасности эксплуатации роботов.

**Ключевые слова:** сельскохозяйственный робот, SLAM, карта глубины, нейронная сеть, анизотропный градиент, реконструкция карт глубины.

■ **Для цитирования:** Гапон Н.В., Воронин В.В., Рудой Д.В., Жданова М.М. Модифицированный SLAM для навигации сельскохозяйственных роботов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №2. С. 19–25. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-19-25. EDN: SKWTMC.

Scientific article

## Modified SLAM for Agricultural Robot Navigation

**Nikolay V. Gapon<sup>1</sup>,**

researcher,

e-mail: nikolay-rt@mail.ru;

**Viacheslav V. Voronin<sup>2</sup>,**

Ph.D.(Eng.), associate professor,

e-mail: voronin\_sl@mail.ru;

**Dmitriy V. Rudoy<sup>1</sup>,**

Dr.Sc.(Eng.), leading researcher,

e-mail: rudoy.d@gs.donstu.ru;

**Marina M. Zhdanova<sup>1</sup>,**

researcher,

e-mail: mpismenskova@mail.ru

<sup>1</sup>Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation;<sup>2</sup>Scientific-Manufacturing Complex «Technological Centre», Zelenograd, Russian Federation

*This research was supported by a grant from the «Science-2030» program.*

**Abstract.** The study proposes a novel method for reconstructing missing regions in depth maps, aimed at improving the accuracy of autonomous navigation in agricultural robotic systems. (*Research purpose*) The primary objective is to develop a method capable of compensating for data loss in depth maps, thereby improving the performance of Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) systems. (*Materials and methods*) The depth map reconstruction method consists of three main stages: computation of the anisotropic gradient; identification of similar blocks based on a novel similarity criterion; and merging of the detected blocks using a neural network architecture composed of an encoder, a fusion layer, and a decoder. The method was tested using the Rosario dataset, which includes scenarios representative of complex agricultural environments. (*Results and discussion*) The proposed depth map reconstruction method demonstrates a significant improvement in quality metrics. Specifically, Root Mean Square Error (RMSE), Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), and Structural Similarity Index Measure (SSIM) improved by 20–30 percent compared to the existing techniques. The method preserves the structure and texture features of the reconstructed regions, enabling accurate restoration of large areas with missing pixel data. To evaluate the impact on SLAM performance, the Stereo Multi-State Constraint Kalman Filter (S-MSCKF) algorithm was employed. Quantitative analysis of Absolute Trajectory Error (ATE) and mean RMSE was conducted both before and after applying the depth map reconstruction. The results show a reduction in Absolute Trajectory Error from 0.62 meters to 0.25 meters, and a decrease in Root Mean Square Error from 0.85 meters to 0.39 meters. (*Conclusions*) The proposed method substantially enhances SLAM system accuracy, particularly in challenging agricultural environments, characterized by uneven terrain, variable lighting conditions, and long-distance navigation. Its robust performance suggests strong potential for large-scale integration into autonomous agricultural machinery, contributing to improved reliability, operational efficiency, and safety in robotic field operations.

**Keywords:** agricultural robot, Simultaneous Localization and Mapping System (SLAM), depth map, neural network, anisotropic gradient, depth map reconstruction.

■ **For citation:** Gapon N.V., Voronin V.V., Rudoy D.V., Zhdanova M.M. Modified SLAM for agricultural robot navigation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N2. 19-25 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-19-25. EDN: SKWTMC.

Сегодня роботы используются практически во всех аспектах нашей повседневной жизни для решения различных задач на производстве, в медицине, науке и др. Роботизация в агропромышленном комплексе [1] доказала свою эффективность при посеве семян [2], внесении удобрений, точном опрыскивании растений, поливе [3], в контроле состояния посевов, борьбе с сорняками [4], уборке урожая. Внедрение стратегии взаимодействия человека и робота (*Human Robot Interaction, HRI*) в сельском хозяйстве способствует автоматизации процессов и позволяет снизить себестоимость производства продукции, уменьшить утомительный ручной труд, повысить точность механизированных операций, качество свежей продукции, улучшить экологический контроль.

Эффективность концепции *HRI* достигается за счет оснащения сельскохозяйственных машин системами компьютерного зрения (СКЗ) и реализующими алгоритмами. СКЗ могут быть представлены различными датчиками, позволяющими видеть окружающее пространство, распознавать целевые объекты и препятствия, оценивать расстояние до них, строить траекторию перемещения.

Для определения расстояния от датчика СКЗ до целевого объекта используются методы построения карты глубины. Карта глубины – это изображение, в котором вместо цвета каждый пиксель со-

держит информацию о расстоянии от камеры до объекта наблюдения [5].

Одним из наиболее популярных и доступных на сегодняшний день методов построения траектории перемещения робота является *SLAM* (одновременная локализация и картографирование) [6]. Это метод разработан для решения проблемы самолокализации и картографии в неизвестной среде, широко используется в навигации роботов [7], автономном вождении, дополненной и виртуальной реальности. Входными данными для алгоритмов *SLAM* являются измерения с использованием датчиков для построения карты глубины.

Одна из проблем систем *SLAM* – потерянные участки на карте глубины [8], что приводит к снижению точности планирования траектории перемещения. Подобные дефекты появляются из-за плохого освещения, наличия зеркальной или мелкозернистой поверхности предметов. В результате появляется эффект увеличенных границ объектов (препятствий), а перекрытие объектов делает невозможным отличить один объект от другого [8].

Для приложений навигации роботов карты глубины, созданные с помощью стереокамер, камер *RGB-D* и других датчиков, требуется дополнительная обработка для заполнения недостающих частей с использованием методов реконструкции (заполнения утерянных областей). Однако традиционные

методы закрашивания цветных изображений не могут быть применены непосредственно к картам глубины, так как недостаточно информации для того, чтобы сделать точные выводы о структуре сцены.

**Цель исследования.** Разработать новый метод реконструкции для восстановления потерянных областей на картах глубины для повышения точности автономной навигации роботизированных технологических комплексов (РТК).

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Автономная навигация сельскохозяйственных РТК опирается на технологию одновременной локализации и картирования (SLAM) [6]. Система использует визуальные датчики для получения необходимых данных для построения карты глубины – это изображение  $S_{i,j}$ ,  $i = 1...N$ ,  $j = 1...M$ , где яркость каждого пикселя соответствует расстоянию до объекта. Алгоритм реконструкции карты глубины включает этапы: вычисление анизотропного градиента, адаптивный выбор размера блока, кластеризация изображения, поиск похожих блоков по новому критерию и объединение блоков с помощью нейронной сети.

В качестве первого этапа обработки карты глубины выбирается целевая область ( $\Omega$ ), требующая реконструкции.

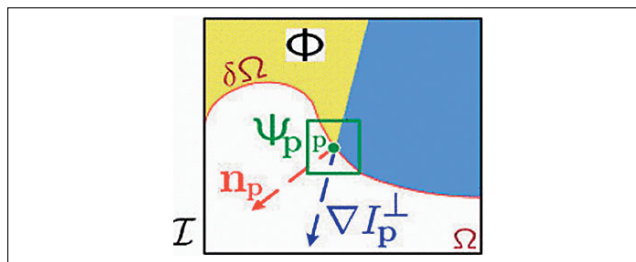


Рис. 1. Модель изображения карты глубины  
Fig. 1. Model of the depth map image

Учитывая блок  $\Psi_p$  с центром в точке  $p$  для некоторого  $p \in \Omega$  (рис. 1), определяется приоритет  $P(p)$  как произведение двух показателей [5]:

$$P(p) = C(p) \cdot D(p), \quad (1)$$

где  $C(p)$  – коэффициент доверия;  $D(p)$  – коэффициент градиента.

Они определяются следующим образом:

$$C(p) = \frac{\sum_{q \in \Psi_p \cap (\Omega - \Omega)} C(q)}{|\Psi_p|}, \quad D(p) = \frac{|\nabla I_p \cdot n_p|}{\alpha}, \quad (2)$$

где  $|\Psi_p|$  – площадь  $\Psi_p$ ;  $\alpha$  – коэффициент нормализации ( $\alpha=255$  для восьми битных изображений);  $n_p$  – единичный вектор, ортогональный границе  $\delta\Omega$  в точке  $p$ ;  $\perp$  обозначает ортогональный оператор.

Расчет приоритета фокусируется на граничных пикселях с резким изменением яркости, содержащих максимальный объем информации. Коэффициент доверия подавляет влияние уже обработанных пикселей, что расширяет область поиска

отсутствующих данных. Градиент представляет собой векторное поле, где каждый пиксель характеризуется вектором, указывающим направление наибольшего изменения интенсивности. Предложен новый метод вычисления анизотропного градиента, обеспечивающий устойчивость к шуму и мелким текстурным деталям.

Для вычисления шаблонов, зависящих от форм, изображение разбивается на  $m \times n$  окон. Из каждого окна извлекаются признаки, соответствующие девяти формам структурного рисунка (рис. 2). Затем для каждого признака вычисляется среднее арифметическое, которое располагается аналогично соответствующему структурному шаблону [9]. Для первой маски для центрального пикселя считаем среднее в локальной области. Далее для восьми направлений считаем среднее арифметическое в масках.

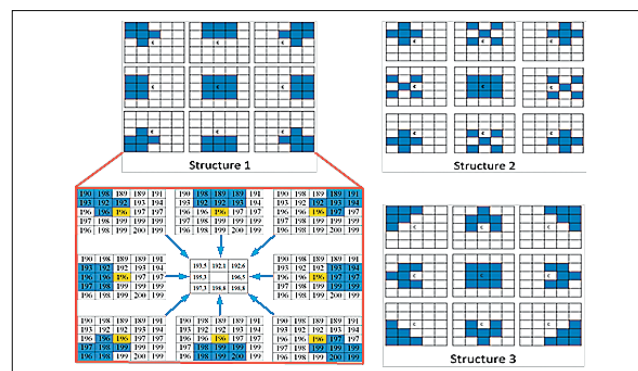


Рис. 2. Структурные области (Structure 1, Structure 2, Structure 3) и вычисление среднего арифметического для восьми направлений

Fig. 2. Structural regions (Structure 1, Structure 2, Structure 3) and arithmetic mean calculation across eight directions

Градиент в соответственном направлении считается как разница между средним в данном направлении (рис. 3).

Для первого направления:  $D_1 = S_{i,j} - S_{i,j-1}$ , для второго направления:  $D_2 = S_{i,j} - S_{i,j+1}$ , для третьего направления:  $D_3 = S_{i,j} - S_{i-1,j}$ , для четвертого направления:  $D_4 = S_{i,j} - S_{i+1,j}$ , для пятого направления:  $D_5 = S_{i,j} - S_{i-1,j+1}$ , для шестого направления:  $D_6 = S_{i,j} - S_{i+1,j-1}$ , для седьмого направления:  $D_7 = S_{i,j} - S_{i-1,j-1}$ , для восьмого направления:  $D_8 = S_{i,j} - S_{i+1,j+1}$ , где  $s$  – текущее значение пикселя изображения с координатами  $(i, j)$ . Учитываются все восемь направлений.

Далее расчет повторяется в областях Structure 2 и Structure 3. Все три градиента усредняются.

Выбор размера блока критически важен для точности реконструкции в методах, использующих поиск похожих блоков. Оптимальный размер зависит от типа области: для текстурных и однородных участков он должен быть больше, чем для областей с четко выраженными границами или контурами.

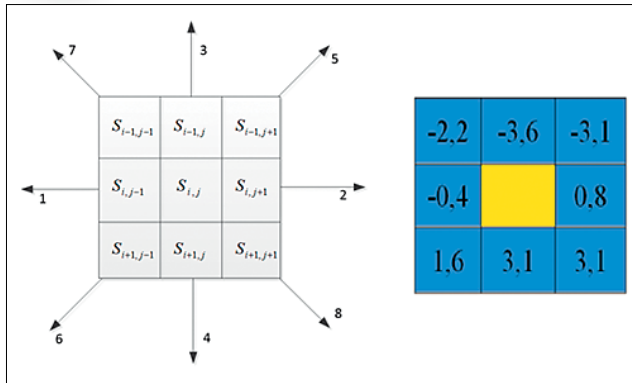


Рис. 3. Градиент для Structure 1

Fig. 3. Gradient for Structure 1

Предлагается использовать адаптивный размер блока, основанный на алгоритме разбиения *QuadTree* [10]. Алгоритм начинается с оценки неоднородности блока путем вычисления среднего значения его яркости

$$C_{avg} = \frac{1}{K \times K} \cdot \sum(C_{i,j}), \quad (3)$$

где  $C_{i,j}$  — яркость (цвет) пикселя  $(i,j)$ .

Дисперсия блока

$$Var = \frac{1}{K \times K} \cdot \sum(C_{i,j} - C_{avg})^2. \quad (4)$$

Разбиение блока происходит, только если значение  $V_{ar}$  превышает порог  $T$ . В этом случае блок признается неоднородным и делится на подблоки. Если  $V_{ar} \leq T$ , блок считается однородным и дальнейшего разбиения не требуется. Результат такого разбиения изображения, формирующего квадродерево, иллюстрируется на рисунке 4.



Рис. 4. Изображения «Виноградные ряды», разбитые на квадродерево

Fig. 4. Quadtree-based segmentation of «Vineyard Rows» images

Для поиска похожих блоков в доступной области изображения можно использовать полный поиск по всему изображению или локальный поиск в окрестности текущего пикселя. Однако оба метода несовершенны. Предлагаемый подход, основанный на предварительной кластеризации изображения, позволяет сузить область поиска для каждого блока, повышая эффективность.

Эффективная обработка изображений требует

оптимального использования пространственной информации окрестности каждой точки. Фиксированные окна обработки имеют ограничение: малые окна упускают контекст, большие — чрезмерно увеличивают вычислительную нагрузку. Предлагаемый алгоритм решает эту проблему, используя адаптивное определение окрестности на основе суперпикселей, что улучшает качество реконструкции. Выбор оптимального структурирующего элемента для обработки градиентов изображения сложен и зависит от его особенностей. Для устранения этой зависимости предлагается использовать несколько структурирующих элементов, реконструировать градиентное изображение для каждого из них и затем объединить результаты. Это позволяет получить более стабильный и независимый от выбора элемента результат:

$$R_f^{MC}(g, r_1, r_2) = \vee \{R_f^C(g)_{B_{r_1}}, R_f^C(g)_{B_{r_1+1}}, \dots, R_f^C(g)_{B_{r_2}}\} \quad (5)$$

где  $r$  — радиус;  $r_1$  и  $r_2$  — минимальное и максимальное значения соответственно,  $r_1 \leq r \leq r_2$ ,  $r_1, r_2 \in N^+$ ,  $g \leq B$ ;  $B$  — структурирующий элемент;  $g$  — изображение маркера;  $R^C$  — морфологическая реконструкция закрытия.

Предложенный алгоритм использует два параметра:  $r_1$ , определяющий минимальный размер области, и  $r_2$ , определяющий максимальный размер области.

Оптимальное значение  $r_1$  находится в диапазоне от 1 до 3. При  $r_1 < 1$  результат содержит множество мелких областей, при  $r_1 > 3$  снижается точность контура. Значения  $r_1$  от 1 до 3 обеспечивают высокую точность контура и удаление мелких областей.

Параметр  $r_2$  влияет на максимальный размер области; его увеличение улучшает результат, но после достижения некоторого порогового значения дальнейшее увеличение не оказывает влияния. При достаточно больших значениях  $r_2$  алгоритм сходится к оптимальному результату — изображению с меньшим количеством областей и высокой точностью контура. Таким образом, алгоритм малочувствителен к изменению  $r_2$  выше порогового значения:

$$\max\{R_f^{MC}(g, r_1, r_2) - R_f^{MC}(g, r_1, r_2 + 1)\} \leq \eta \quad (6)$$

В уравнении (6) переменную  $r_2$  можно заменить на константу  $\eta$ , поскольку  $r_2$  индивидуально меняется для каждого изображения, тогда как  $\eta$  одинаково для всех. Выбор  $\eta$  критичен: слишком большое его значение приводит к малой величине  $r_2$  и большой ошибке, а слишком маленькое — к малой ошибке, но большим  $r_2$  и, соответственно, высоким вычислительным затратам. Поэтому значение  $\eta$  должно быть подобрано оптимально для конкретного набора данных. Учитывая сложность задания

индивидуальных значений  $r_2$  для каждого изображения и адаптивный характер  $r_2$  в реальных приложениях, предложенный алгоритм использует минимальный порог ошибки  $\eta$  вместо  $r_2$ , эффективно уменьшая  $\eta$ . При этом, если  $\eta \leq 10^{-4}$ , то  $r_2$  не изменяется. В данном алгоритме принято  $\eta=10^{-4}$ .

Выбор наиболее подходящего блока осуществляется на основе сравнения с использованием метрики сходства изображений. Цель – восстановить изображение, минимизируя видимые артефакты внутри, снаружи и вокруг реставрированных участков. В предложенном методе используется метрика сходства градиентов, определяемая как

$$G(I_r, I_{inp}) = \frac{2 \sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{H-1} D_r^{ij} G_{inp}^{ij} + K_2}{\sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{H-1} [D_r^{ij}]^2 + \sum_{i=0}^{W-1} \sum_{j=0}^{H-1} [D_{inp}^{ij}]^2 + K_2}, \quad (7)$$

где  $D$  – величина градиента;  $K_2$  – небольшая положительная константа.

Далее для найденных похожих блоков применяется разработанная нейронная сеть, которая позволяет получить результирующий блок путем объединения найденных блоков. Архитектура нейронной сети состоит из трех элементов: это кодировщик, слой слияния и декодер (рис. 5).

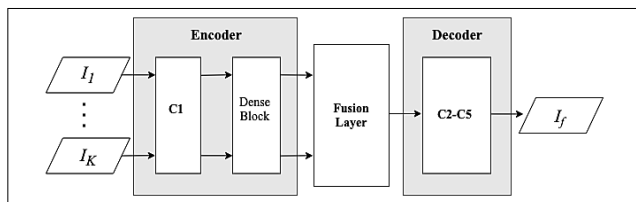


Рис. 5. Архитектура нейронной сети для объединения найденных блоков

Fig. 5. Neural network architecture for merging detected blocks

В качестве входных сигналов используются найденные блоки, которые обозначаются  $I_1, \dots, I_k$  и  $k \geq 2$ . Процедура обучения сети подробно представлена в работе [11].

После того, как блок  $\Psi_p$  был заполнен новыми

значениями пикселей, коэффициент доверия  $C(p)$  обновляется в области, ограниченной  $\Psi_p$ , следующим образом:

$$C(p) = C(\hat{p}) \forall p \in \Psi_p \cap \Omega. \quad (8)$$

Это правило упрощает оценку достоверности данных на краях обрабатываемой области. С увеличением заполненной области достоверность данных снижается, что отражает уменьшение уверенности в цветовых значениях пикселей ближе к центру целевой области.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Эксперимент проводился с использованием набора данных *Rosario* [12]. На рисунке 6 представлены результаты реконструкции карт глубины: исходные RGB-изображения (слева), необработанные карты глубины (в центре) и карты глубины, реконструированные с помощью предложенного алгоритма (справа).

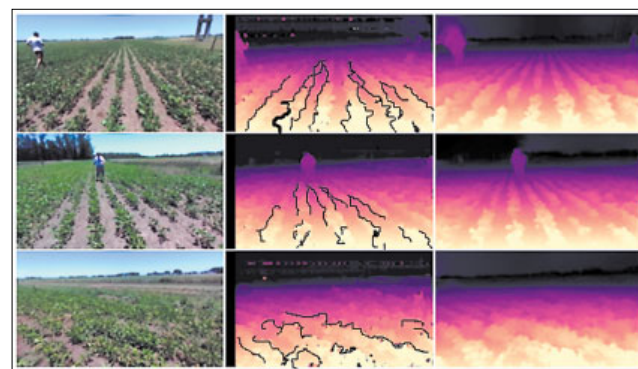


Рис. 6. Результаты реконструкции карт глубины из датасета Rosario

Fig. 6. Results of depth map reconstruction from the Rosario dataset

Предложенный метод обеспечивает точное восстановление границ без потери четкости текстуры и структуры, даже при реконструкции больших участков с отсутствующими пикселями.

В таблице 1 приведено сравнение погрешности

| Таблица 1                                                                                                                                                          |       |          |             |                    | Table 1 |          |             |                    |      |          |             |                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------|-------------|--------------------|---------|----------|-------------|--------------------|------|----------|-------------|--------------------|
| ЗНАЧЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ДЛЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕТОДА, МЕТОДОВ EBM, DEEPFill И EDGECONNECT<br>ERROR VALUES FOR THE PROPOSED METHOD AND EBM, DEEPFill, EDGECONNECT METHODS |       |          |             |                    |         |          |             |                    |      |          |             |                    |
| Изображения                                                                                                                                                        | PSNR  |          |             |                    | RMSE    |          |             |                    | SSIM |          |             |                    |
|                                                                                                                                                                    | EBM   | DeepFill | EdgeConnect | Предложенный метод | EBM     | DeepFill | EdgeConnect | Предложенный метод | EBM  | DeepFill | EdgeConnect | Предложенный метод |
| 1                                                                                                                                                                  | 16,36 | 17,05    | 17,32       | 18,60              | 31,19   | 29,60    | 27,49       | 24,68              | 0,95 | 0,96     | 0,97        | 0,98               |
| 2                                                                                                                                                                  | 17,26 | 18,26    | 18,45       | 19,94              | 27,11   | 26,20    | 24,90       | 20,13              | 0,95 | 0,98     | 0,98        | 0,98               |
| 3                                                                                                                                                                  | 12,23 | 13,76    | 14,03       | 16,53              | 36,57   | 35,88    | 34,01       | 31,86              | 0,96 | 0,96     | 0,97        | 0,99               |
| Среднее по всей базе                                                                                                                                               | 15,22 | 16,23    | 16,54       | 17,57              | 31,62   | 30,9     | 29,08       | 26,11              | 0,95 | 0,96     | 0,98        | 0,99               |

Таблица 2

Table 2

| СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ <b>RMSE</b> И АБСОЛЮТНОЙ ОШИБКИ ТРАЕКТОРИИ ( <b>ATE</b> )<br>MEAN VALUES OF <b>ROOT MEAN SQUARE ERROR (RMSE)</b> AND <b>ABSOLUTE TRAJECTORY ERROR (ATE)</b> |                             |      |                                |             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------|--------------------------------|-------------|
| Последовательность                                                                                                                                                           | S-MSCKF<br>до реконструкции |      | S-MSCKF<br>после реконструкции |             |
|                                                                                                                                                                              | ATE(м)                      | RMSE | ATE(м)                         | RMSE        |
| Rosario 01                                                                                                                                                                   | 0,62                        | 0,85 | <b>0,25</b>                    | <b>0,39</b> |
| Rosario 02                                                                                                                                                                   | 1,25                        | 1,31 | <b>0,63</b>                    | <b>0,74</b> |
| Rosario 03                                                                                                                                                                   | 1,2                         | 1,33 | <b>0,61</b>                    | <b>0,76</b> |

предложенного метода с методами *EBM* [5], *DeepFill* [13] и *EdgeConnect* [13] на тестовых картах глубины из набора *Rosario*.

Для сравнительного анализа точности *SLAM*-алгоритмов, в качестве эталона был выбран *S-MSCKF* [14]. В *таблице 2* отражены количественные результаты, представляющие средние значения абсолютной ошибки траектории (*ATE*) и среднеквадратичной ошибки (*RMSE*) [15] до и после реконструкции карт глубины. Значения *ATE* и *RMSE* вычислены путем усреднения результатов пяти независимых запусков на каждой последовательности. Наилучшие результаты (минимальные ошибки) выделены жирным шрифтом.

Результаты *RMSE* и *ATE* после реконструкции карт глубины превосходят значения *RMSE* и *ATE* до реконструкции.

**Выводы.** Предложенный метод обеспечивает на 20-30% меньшую ошибку реконструкции по сравнению с традиционными подходами. Его эффективность подтверждена экспериментами по реконструкции карт глубины.

Сложные условия, такие как повторяющиеся сельские ландшафты, изменяющееся освещение, протяженные траектории и динамические эффекты ветра, представляют значительные трудности для современных систем визуального *SLAM*. Однако результаты, полученные с использованием *S-MSCKF*, продемонстрировали наилучший результат после реконструкции карт глубины. Это открывает перспективы применения *Visual SLAM* в недорогих сенсорных системах, повышая надежность и точность автономной навигации сельскохозяйственных систем.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. и др. О синтезе роботизированного сельскохозяйственного мобильного агрегата // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2019. N4. С. 63-68. DOI: 10.30850/vrsn/2019/4/63-68.
- Смирнов И.Г., Хорт Д.О., Кутырев А.И. Интеллектуальные технологии и роботизированные машины для возделывания садовых культур // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N4. С. 35-41. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-35-41.
- Ценч Ю.С., Курбанов Р.К., Захарова Н.И. Развитие систем управления полетом и средств аэрофотосъемки беспилотных воздушных судов сельскохозяйственного назначения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N2. С. 11-19. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19.
- Смирнов И.Г., Дышеков А.И., Девяткин Ф.В. Алгоритм работы автономного роботизированного комплекса мониторинга сорной растительности // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2024. Т. 71. N1(54). С. 71-75. DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-1-71-75.
- Зеленский А.А., Гапон Н.В., Жданова М.М. и др. Метод восстановления карты глубины в задачах управления роботами и мехатронными системами // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2022. Т. 23. N2. С. 104-112. DOI: 10.17587/mau.23.104-112.
- Павлов А.С. Методика планирования траектории движения группы мобильных роботов в неизвестной замкнутой среде с препятствиями // *Системы управления, связи и безопасности*. 2021. N 3. С. 38-59. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-3-38-59.
- Тетерев А.В. Обоснование выбора системы позиционирования для управления движением мобильного сельскохозяйственного робота // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N4. С. 63-70. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-63-70.
- Кутырев А.И., Дышеков А.И. Разработка системы управления движением роботизированной платформы на основе методов лазерной дальнометрии (LiDAR) // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25. N2. С. 19-27. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-2-19-27.
- Panetta K., Sanghavi F., Agaian S., Madan N. Automated detection of COVID-19 cases on radiographs using shape-dependent Fibonacci-p patterns. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. 2021. Vol. 25. N6. 1852-1863. DOI: 10.1109/JBHI.2021.3069798.
- Yang S., Liang H., Wang Y. et al. Image inpainting based on multi-patch match with adaptive size. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. N14. 4921. DOI: 10.3390/app10144921.
- Voronin V., Gapon N., Khamidullin I. et al. E. A vision system using depth inpainting for virtual content reconstruction in Augmented Reality. *ProcSPIE*. 2022. Vol. 12275. 146-156. DOI: 10.1117/12.2642007.
- Подтихов А.В., Савельев А.И. Открытый набор данных для тестирования Visual SLAM-алгоритмов при различных погодных условиях // *Труды учебных заведений связи*. 2024. Т. 10. N1. С. 97-106. DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-1-97-106.
- Kim H., Kim C., Kim H. et al. Panoptic blind image inpainting. *ISA transactions*. 2023. Vol. 132. 208-221. DOI: 10.1016/j.isatra.2022.10.030.

14. Zhang Z., Dong P., Wan J., Sun Y. Improving S-MSCKF with variational Bayesian adaptive nonlinear filter. *IEEE Sensors Journal*. 2020. Vol.20. N16. 9437-9448. DOI: 10.1109/jsen.2020.2989206.
15. Боковой А.В. Муравьев К.Ф., Яковлев К.С. Система одно-

временного картирования, локализации и исследования неизвестной местности по видеопотоку // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2020. N2. С. 51-61. DOI: 10.14357/20718632200205.

## REFERENCES

1. Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Tsench Yu.S. et al. About synthesis of robotic agriculture mobile machine. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2019. N4. 63-68 (In Russian). DOI: 10.30850/vrsn/2019/4/63-68.
2. Smirnov I.G., Khort D.O., Kuttyrev A.I. Intelligent technologies and robotic machines for cultivating horticultural crops. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. Vol. 15. N4. 35-41 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-35-41.
3. Tsench Yu.S., Kurbanov R.K., Zakharova N.I. Evolution of flight control systems and aerial photography in unmanned agricultural aircraft. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 11-19 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19. EDN: JPLEGX
4. Smirnov I.G., Dyshekov A.I., Devyatkin F.V. Operation algorithm for the autonomous robotic weed monitoring system. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2024. Vol. 71. N1(54). 71-75 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2024-71-1-71-75.
5. Zelensky A.A., Gapon N.V., Zhdanova M.M. et al. Depth map reconstruction method in control problems for robots and mechatronic systems. *Mechatronics, Automation, Control*. 2022. Vol. 23. N2. 104-112 (In Russian). DOI: 10.17587/mau.23.104-112.
6. Pavlov A.S. Methodology for planning the trajectory of a group of mobile robots in unknown closed environment with obstacles. *Systems of Control, Communication and Security*. 2021. N3. 38-59 (In Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2021-3-38-59.
7. Teterev A.V. Rationale for the choice of a positioning system for mobile agricultural robot movement controlling. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N4. 63-70 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-4-63-70.
8. Kuttyrev A.I., Dyshekov A.I. Development a motion control system for a robotic platform based on laser ranging methods (LiDAR). *Agricultural Engineering*. 2023. Vol. 25. N2. 19-27 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2023-2-19-27.
9. Panetta K., Sanghavi F., Agaian S., Madan N. Automated detection of COVID-19 cases on radiographs using shape-dependent Fibonacci-p patterns. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. 2021. Vol. 25. N6. 1852-1863 (In English). DOI: 10.1109/JBHI.2021.3069798.
10. Yang S., Liang H., Wang Y. et al. Image inpainting based on multi-patch match with adaptive size. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. N14. 4921 (In English). DOI: 10.3390/app10144921.
11. Voronin V., Gapon N., Khamidullin I. et al. A vision system using depth inpainting for virtual content reconstruction in Augmented Reality. *ProcSPIE*. 2022. Vol. 12275. 146-156 (In English). DOI: 10.1117/12.2642007.
12. Podtikhov A.V., Saveliev A.I. Open dataset for testing of Visual SLAM algorithms under different weather conditions. *Proceedings of Telecommun. Univ*. 2024. Vol. 10. N1. 97-106 (In Russian). DOI: 10.31854/1813-324X-2024-10-1-97-106.
13. Kim H., Kim C., Kim H. et al. Panoptic blind image inpainting. *ISA transactions*. 2023. Vol. 132. 208-221 (In English). DOI: 10.1016/j.isatra.2022.10.030.
14. Zhang Z., Dong P., Wan J., Sun Y. Improving S-MSCKF with variational Bayesian adaptive nonlinear filter. *IEEE Sensors Journal*. 2020. Vol. 20. N16. 9437-9448 (In English). DOI: 10.1109/jsen.2020.2989206.
15. Bokovoy A.V., Muraviev K.F., Yakovlev K.S. Vision-based simultaneous localization, mapping and exploration system. *Journal of Information Technologies and Computation Systems*. 2020. N2. 51-61 (In Russian). DOI: 10.14357/20718632200205.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Заявленный вклад соавторов:

Гапон Н.В. – руководство исследованием, разработка алгоритма, создание окончательной версии рукописи;  
Воронин В.В. – разработка алгоритма;  
Рудой Д.В. – администрирование проекта, создание черновика рукописи;  
Жданова М.М. – редактирование текста, формулировка выводов;

Авторы одобрили окончательный вариант рукописи.

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

## Coauthors' contribution:

Gapon N.V. – research supervision, algorithm development, development of the final manuscript version (refining);  
Voronin V.V. – algorithm development;  
Rudoy D.V. – project administration, drafting the manuscript;  
Zhdanova M.M. – proofreading and refining the manuscript, formulation of conclusions;

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

01.04.2025

26.05.2025



## Инфраструктура цифрового пастбищного животноводства в аридных зонах

Сергей Содномович Доржиев,  
кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
e-mail: Dss.61@mail.ru;

Елена Геннадьевна Базарова,  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
e-mail: Bazelgen08@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Современная экономическая и экологическая обстановка в мире, опустынивание, деградация земель, изменения климата и экосистем приводят к необходимости принятия мер в области устойчивого землепользования. Несмотря на ряд преимуществ пастбищного животноводства, при свободном выпасе возникают трудоемкие задачи поиска, слежения, контроля за состоянием поголовья, риск потери скота в условиях дикой природы, а также учет давления на пастбища. (*Цель исследования*) Разработка инфраструктуры цифрового пастбища в виде универсальной и целостной системы с автономным энерго- и водоснабжением для автоматизации вспомогательных процессов. (*Материалы и методы*) Изучены методы по повышению эффективности пастбищ. Выявлено, что существующие технологии направлены на решение одной задачи, например водообеспечения, ротации пастбищных угодий, мониторинга и т.п., однако нет единой методики, которая охватывает всю систему пастбищной инфраструктуры с учетом взаимодействия ее элементов. (*Результаты и обсуждение*) Предложена концепция цифрового пастбища на основе источников возобновляемой энергетики. Разработана схема инфраструктуры пастбищного и отгонного животноводства. Сформированы отдельные блоки инфраструктуры: связь, мониторинг, водоснабжение, электрификация, транспорт, головной диспетчерский пункт, блок подкормки. Сконструированы и запатентованы индивидуальные попоны с датчиками состояния животного, пост мониторинга, ветроэнергетическая станция, экстрактор воды из воздуха. На практике опробован в Астраханской области пост мониторинга, включающий учет, контроль, мониторинг и блок связи на базе возобновляемой энергии. Испытаны в Ярославской области индивидуальные попоны с датчиками мониторинга состояния животного на опытном поголовье телят. Проведены испытания в натурных условиях экстрактора атмосферной влаги. В южных регионах и Московской области проводятся испытания многоагрегатного ветроэнергетического комплекса, предназначенного для регионов с низким ветровым потенциалом. (*Выводы*) Модульность предлагаемой системы позволяет применить различные наборы технологий и функций блоков в зависимости от специфики производства. Необходимость создания и внедрения цифровой интеллектуальной системы для инфраструктуры пастбищного и отгонного животноводства, функционирующей на основе цифровых, природосберегающих и природоподобных технологий, в настоящее время актуальна и нова.

**Ключевые слова:** пастбищное животноводство, социальная инфраструктура, возобновляемая энергетика, природосберегающие и природоподобные технологии, климат, почвы, окультуривание.

■ **Для цитирования:** Доржиев С.С., Базарова Е.Г. Инфраструктура цифрового пастбищного животноводства в аридных зонах // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №2. С. 26-32. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-26-32. EDN: UNCSXD.

Scientific article

## Infrastructure for Digital Pasture-Based Livestock Production in Arid Zones

Sergei S. Dorzhiev,  
Ph.D.(Eng.), leading researcher,  
e-mail: Dss.61@mail.ru;

Elena G. Bazarova,  
Ph.D.(Eng.), senior researcher,  
e-mail: Bazelgen08@mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Centre VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The current global economic and environmental context, which is characterized by desertification, land degradation, climate change, and ecosystem disruption, necessitates urgent action in sustainable land use. While pasture-based livestock farming offers numerous advantages, free-range grazing presents several labor-intensive challenges, such as locating and tracking animals, monitoring livestock health, mitigating the risk of loss in wild environments, and regulating grazing pressure on pastures.

(*Research purpose*) To develop a digital pasture infrastructure as a universal, integrated system with autonomous energy and water supply, aimed at automating auxiliary processes in pasture-based livestock farming. (*Materials and methods*) Various approaches to improving pasture efficiency were reviewed. The analysis revealed that existing technologies typically address isolated aspects, such as water supply, pasture rotation, or livestock monitoring. However, they lack a comprehensive system that integrates the entire pasture infrastructure and the interactions among its components. (*Results and discussion*) A digital pasture concept based on renewable energy sources is proposed. An integrated infrastructure model for pasture-based and transhumant livestock farming was developed. The system consists of distinct infrastructure modules, including communication, monitoring, water supply, electrification, transportation, a central dispatch unit, and a supplemental feeding unit. Several components were developed and patented, including individual livestock blankets equipped with condition sensors, a monitoring station, a wind power unit, and an atmospheric water extractor. The monitoring station, capable of data collection, control, monitoring, and communication using renewable energy, was field-tested in the Astrakhan Region. The sensor-equipped livestock blankets were tested on a pilot group of calves in the Yaroslavl Region. Field trials of the atmospheric moisture extractor were also conducted. Additional trials are underway in southern regions and the Moscow Region to evaluate the performance of a multi-unit wind energy complex designed for areas with low wind potential. (*Conclusions*) The modular architecture of the proposed system enables flexible integration of various technologies and functional units, adaptable to the specific needs of local production conditions. The development and implementation of a digital, intelligent infrastructure for pasture-based and transhumant livestock farming, based on resource-efficient, nature-based, and digital technologies, offers a timely and innovative solution.

**Keywords:** pasture-based livestock farming, social infrastructure, renewable energy, resource-efficient and nature-based technologies, climate, soil, land reclamation.

■ **For citation:** Dorzhiev S.S., Bazarova E.G. Infrastructure for digital pasture-based livestock production in arid zones. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N2. 26-32 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-26-32. EDN: UNCSXD.

Замена пастбищной технологии сезонного использования полевых угодий на стационарный подход со стойловым содержанием сельскохозяйственных животных, увеличение масштабов земледелия, регулярного орошения, перегрузка пастбищ во многих странах привели к потере устойчивой среды обитания.

В результате нерационального землепользования пастбищные угодья деградировали, значительно потеряв свою биологическую и экономическую продуктивность. В мировом масштабе 70% засушливых земель, а это около 3,6 млрд га, подвержены процессам деградации. Глобальной стала проблема возникновения антропогенных пустынь [1]. В этих условиях отгонное животноводство можно использовать с наибольшим эффектом только при наличии достаточного количества кормов, воды, организации социально-бытовых условий для работников пастбища.

В последнее время уделяется внимание созданию и развитию цифровых систем в сельском хозяйстве [2], в частности, в животноводстве [3, 4]. Стала очевидной необходимость создания и внедрения интеллектуальной системы развития и улучшения инфраструктуры пастбищного и отгонного животноводства, функционирующей на основе цифровых, природосберегающих и природоподобных технологий [5, 6].

В современном аграрном производстве на первый план выдвигается необходимость организации цифровой инфраструктуры, соответствующей ре-

алиям времени. Однако единый подход к формированию и оснащению такой инфраструктуры отсутствует. Не определен порядок и методические принципы проведения технических экспертиз по выбору и оценке технических средств, предлагаемых для оснащения инфраструктуры.

Разработка типовой автономной энергетической площадки для инфраструктуры пастбищного и отгонного животноводства, создание систем микроклимата животных, автоматизированного водоснабжения, мобильных электротранспортных средств позволят обеспечить рентабельность при сохранении и улучшении качества земель. Как известно, при пастбищном животноводстве затраты на производство продукции на 40-50% меньше, чем при стойловом содержании поголовья [7, 8]. При этом капитальные вложения на обводнение и освоение пастбищ окупаются в два раза быстрее, чем в других отраслях сельского хозяйства.

**Цель исследования.** Разработать концепцию цифрового пастбища в рамках интеграции традиционного пастбищного и отгонного животноводства с современными технологиями для обеспечения производственной и социальной инфраструктуры на базе возобновляемых источников энергии.

**Материалы и методы.** К наиболее важным факторам, влияющим на эффективность пастбищного животноводства, относится давление, оказываемое животными на пастбищные угодья. Вопросы разработки стратегии измерения параметров пастбища для точного управления продуктивностью с це-

люю избежать чрезмерной нагрузки на пастбище и животных, а также ротации пастбищных угодий изучались в различных трудах [9, 10]. Так, рекомендуется порядок землеустройства, когда проектирование и ведение пастбищеоборота обеспечивает регулируемый выпас скота по сезонам года; для более четкого контроля выпаса скота каждый сезонный участок делится на загоны очередного стравливания.

Кроме этого, в хозяйствах должно быть организовано рациональное территориальное расположение пастбищ и пашен с учетом животноводческих ферм, населенных пунктов и использования всех земельных площадей [11, 12].

Изучались отдельные вопросы обеспечения водой пастбищных участков и анализ эффективности установок для их водоснабжения в работах (Цопанов Н.Е., Гриднев Н.И., Заруцкий В.М. и др. Эффективность применения технических средств электромеханизированного водоснабжения пастбищного животноводства; матер. 8-й Межд. науч.-практ. конф. «Перспективы развития АПК в современных условиях», 2019. Владикавказ) [13]. Отмечалось, что повышение экономической и экологической эффективности может быть достигнуто за счет возобновляемых источников энергии [14, 15].

Для эффективного использования земельного фонда многие страны осваивают пустыни и полупустыни для ведения сельскохозяйственной деятельности с помощью мелиорации. Например, в Сельскохозяйственном институте Шихези по засушливым районам в Центральной Азии (Синьцзян-Уйгурский автономный район, КНР) провели исследования по выращиванию соевой культуры на песке, привезенном из Джунгарской равнины (полупустыня), с применением капельного орошения и мульчирования [16].

Таким образом, круг проблем, возникающих в ходе хозяйственной деятельности на пастбище, довольно широкий. Но среди существующих трудов не представлены вопросы интеграции этих модулей друг с другом и целостного системного взаимодействия.

**Результаты и обсуждение.** Задача цифровизации инфраструктуры пастбищного и отгонного животноводства состоит главным образом в отделении основного базового производства, т.е. выпуска требуемого продукта (например, мяса и молока), от вспомогательных технологических процессов, которые могут быть автоматизированы на базе современных цифровых технологий [17, 18].

Для обеспечения производственной и социальной инфраструктуры пастбищного и отгонного животноводства авторами разработана схема (рис. 1) с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

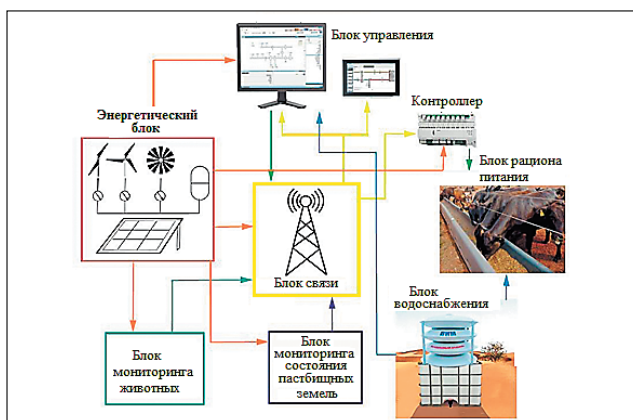


Рис. 1. Схема инфраструктуры пастбищного и отгонного животноводства, с использованием возобновляемых источников энергии

Fig. 1. Structural diagram of the infrastructure of pasture-based and transhumance livestock farming powered by renewable energy sources

Схема включает семь блоков:

- энергетический блок;
- блок водоснабжения и планирования водопойных пунктов на базе ВИЭ;
- блок мониторинга стада, в том числе поголовья (количественный), состояния и местонахождения (индивидуальный) животного;
- блок мониторинга состояния и использования пастбищных земель;
- блок рациона питания, тесно связанный с блоками мониторинга животных и состояния земель. В зависимости от состояния животных, параметров окружающей среды, сезонности, кормовой базы этот блок выполняет функцию определения кормовой массы, объемов витаминизированной подкормки;
- блок управления со стационарным и мобильным диспетчерскими пунктами. В головной системе мониторинга в стационарном пункте происходят сбор, хранение и обработка данных, поступающих из других блоков с помощью блока связи;
- блок связи, обеспечивающий устойчивую связь для больших данных и технологий интернета с питанием от возобновляемых источников энергии.

**Энергетический блок.** Состоит из многоагрегатных ветроэнергетических установок с вихревым ускорителем с использованием энергии ветра и солнечной энергии для бесперебойного энергообеспечения блоков связи и мониторинга. Для энергообеспечения модулей связи, социально-бытовых помещений для работников, а также блоков мониторинга метеостанций разработана многоагрегатная ветровая электростанция с гидросистемой, смонтированная на научном ветрополигоне ФГБНУ ФНАЦ ВИМ для экспериментальной эксплуатации, установленная в 2019г. В г. Истра (Московская область) (рис. 2).



Рис. 2. Энергетический блок на ветрополигоне  
Fig. 2. Energy unit at the wind testing site

Ветровая электростанция рассчитана на широкий диапазон скоростей ветра для стабильного энергоснабжения цифрового пастбища. Для этой цели на ветрополигоне разрабатывается опытная многоагрегатная ветровая установка с разными параметрами ветроприемных устройств (ВПУ), работающих на единую нагрузку.

**Блок водоснабжения.** В схеме инфраструктуры подразумевается наличие передвижных или стационарных водопойных пунктов. Энергоснабжение данных объектов от централизованной сети является неэффективным и нерентабельным.

В летний период расход воды на одну корову достигает 60-70 л, на одну голову молодняка крупного рогатого скота до одного года – 15-20 л, взрослую овцу – 5-6 л, взрослую лошадь – 50-60 л.

Проектирование водоисточников и водопойных пунктов предусматривает определение количества воды (для скота, производственных и бытовых нужд) на весь пастбищный период и в сутки. Мощность системы водоснабжения (водообеспечения) должна быть не менее указанных выше цифр, но и не более 15% для сохранения водных запасов. Также определяются тип и местоположение водных сооружений на пастбищах.

В засушливых аридных зонах стационарные водопойные пункты устроены с помощью экстракторов атмосферной влаги. Для системы водоснабжения и водообеспечения на базе ФГБНУ ФНАЦ ВИМ разработан и изготовлен экспериментальный образец экстрактора без вращающихся деталей и узлов с использованием возобновляемых источников энергии для создания оазисов с искусственными водоемами или водоснабжения потребителей (рис. 3).

**Блок мониторинга животных.** Обеспечивает базовый ветеринарный надзор за состоянием животных автоматически на основании параметров животных, передаваемых датчиками на индивидуальных попоны или постах мониторинга, так и ветеринарным врачом, который может на основании статистических данных животных предпринимать



Рис. 3. Монтаж установки и внешний вид экспериментального экстрактора воды из атмосферного воздуха  
Fig. 3. Installation and external view of the experimental atmospheric water extractor

превентивные меры для предотвращения заболевания.

С помощью попоны в реальном времени измеряются основные параметры и местонахождение каждого животного для автоматической диагностики стада и отдельных животных, а также передачи ветеринарному врачу и владельцу. Кроме этого, мониторинг животных может быть полезен с точки зрения предотвращения заболеваний, связанных с особенностями окружающей среды (дождь, низкая температура и др.) путем коррекций в блоке «Рацион».

Универсальное транспортное средство обеспечивает мобильное перемещение по территории пастбища, улучшение условий труда.

Современные технологии содержания животных предъявляют высокие требования к микроклимату в животноводческих помещениях. Отклонение параметров микроклимата от установленных пределов приводит к сокращению удоев молока на 10-20%, прироста живой массы – на 20-33%, увеличению отхода молодняка до 5-40%, расходу дополнительного количества кормов, снижению устойчивости к заболеваниям.

Для поддержания требуемого микроклимата на вентиляцию расходуется около 2 млрд кВт·ч электроэнергии в год, а на обогрев помещений дополнительно требуется 1,8 млрд кВт·ч, 0,6 млн м<sup>3</sup> природного газа, 1,3 млн т жидкого и 1,7 млн т твердого топлива (Мишуров Н.П., Кузьмина Т.Н. Энергосберегающее оборудование для обеспечения микроклимата в животноводческих помещениях. М.: Росинформагротех, 2004. 93 с.).

В условиях пастбищ для решения некоторых проблем микроклимата содержания животных предложена индивидуальная комплексная система в виде попоны с микродатчиками температуры животного. При отклонении температуры от нормы это позволяет создавать оптимальный микроклимат и помогает уменьшить зависимость состояния животных от температуры окружающего воздуха и вести ветеринарный мониторинг в стаде (Способ

ранней диагностики заболевания сельскохозяйственных животных на основе одежды из умной ткани. Патент RU 2700089, 2012 г.).

Кроме этого, с помощью блока мониторинга животных можно отслеживать в течение дня прием корма и количество молока, фазы течки и лактации, затраты времени на поедание грубых и подножных кормов и т.д. Экспериментальные образцы индивидуальных попон были протестировали на ферме в Ярославской области (рис. 4).



Рис. 4. Тестирование индивидуальных попон в Ярославской области: а – попона с энергоснабжением от солнечной батареи; б – попона «ВИМ»

Fig. 4. Field testing of individual livestock blankets in the Yaroslavl Region: a – blanket with integrated solar panel; b – «VIM» individual blanket

**Блок связи.** Осуществляет связь между всеми блоками с мобильным и стационарным пунктами блока управления.

**Блок мониторинга состояния и использования пастбищных земель.** Предназначен для многоцелевой оценки пригодности пастбищных земель и моделирования потенциальной урожайности с помощью передачи данных с постов мониторинга, питаемых от энергетического блока. Для аридных зон данный блок включает также систему антигравитационных тепловых труб (АГТС) для регулирования температуры почвы и поддержания экологического каркаса с использованием холода/тепла нижних слоев грунта с целью обеспечения кормового потенциала пастбища на весь пастбищный период (Способ поддержания оптимальной температуры грунта в условиях пустынь и полупустынь для жизнеобеспечения растений и микроорганизмов, Патент RU 2726649, 2020 г.).

**Блок управления.** Представляет собой головной стационарный диспетчерский пункт в помещении с компьютером для сбора, хранения и обработки информации. Диспетчер при необходимости осуществляет вызов ветеринара, удаленно следит за целостностью и безопасностью стада. В распоряжении сотрудников диспетчерского пункта предусмотрено универсальное транспортное средство, а информация с датчиков в этом случае приходит на специальное приложение в сотовом телефоне.

**Блок «Рацион».** Для работы этого блока плани-

руется разработать программу-приложение «Определение кормовой массы» с базой растений, которые встречаются на пастбищах в разных районах с разными климатическими особенностями и могут использоваться в полноценном рационе животных.

Также на базе ФГБНУ ФНАЦ ВИМ разработаны и запатентованы элементы инфраструктуры пастбищного и отгонного животноводства: универсальное транспортно-технологическое устройство «ВИМ» для сельскохозяйственных территорий (Патент RU 2717291, 2020 г.), блок мониторинга окружающей среды, экстракции воды из воздуха в аридных территориях (Способ и установка противопожарного водоснабжения для аридных регионов. Патент RU2686195. 2019 г.).

В инфраструктурную схему пастбищного и отгонного животноводства можно внедрять различные наборы технологий и функций блоков в зависимости от особенностей конкретной местности и специфики производства. Отдельные блоки могут быть использованы в других отраслях. Например, для МЧС и лесного хозяйства могут быть применены видеомониторинг на базе возобновляемых источников энергии, мобильный помощник для медицинского и почтового персонала в сельской местности и т.д.

**Выводы.** При пастбищном и отгонном животноводстве достаточно сложно обеспечить качественный надзор и мониторинг, а периодический отлов животных довольно энергоемкий и затратный по времени. Разработан широкий спектр электронных устройств и цифровых технологий для повышения эффективности пастбищного животноводства. Однако такие технологии разрознены, они не систематизированы, не предусматривают охват практических задач, которые необходимо решать при пастбищном и отгонном животноводстве.

Рационально рассматривать возобновляемые виды энергии в качестве источников автономного энергообеспечения.

Предложен состав инфраструктуры пастбищного и отгонного животноводства, включающий отдельные блоки. На практике благодаря модульности возможно внедрить различные наборы технологий и функций блоков в зависимости от местности и специфики производства.

Вопрос выбора системы и определение критериев может основываться на разных факторах. Их перечень довольно разнообразен, а значимость определяется особенностями различных климатических зон и кругом решаемых задач.

Разработка автономных энергетических платформ для интеллектуальных инфраструктурных систем пастбищного животноводства в удаленных районах, создание систем микроклимата животных, мобильного вездеходного электротранспорта и систем водо-

снабжения позволит снизить себестоимость на 40-50% в сравнении со стойловым содержанием животных. Кроме того, это агрономически выгодное производство для поддержания и улучшения качества земли, так как капитальные вложения в орошение и развитие пастбищ окупаются в 2 раза быстрее, чем в другие виды сельскохозяйственного производства.

### Благодарность

Натурные исследования экстрактора воды из воздуха финансировались Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в соответствии с договором № 2588 ГС1/41347 от 20.06.2018 Старт-18-1 (1 очередь) (заявка С1-41524).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Abdel Rahman M.A.E. An overview of land degradation, desertification and sustainable land management using GIS and remote sensing applications. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*. 2023. N34. 767–808. DOI: 10.1007/s12210-023-01155-3.
2. Лобачевский Я.П., Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Шогенов Ю.Х. Научно-технические достижения агроинженерных научных организаций в условиях цифровой трансформации сельского хозяйства // *Техника и оборудование для села*. 2023. N3(309). С. 2-12. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-3-2-11.
3. Лобачевский Я.П., Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Шогенов Ю.Х. Научно-технические достижения агроинженерных научных организаций в условиях цифровой трансформации сельского хозяйства // *Техника и оборудование для села*. 2023. N4(310). С. 2-5. DOI: 10.33267/2072-9642-2023-4-2-5.
4. Лобачевский Я.П., Бейлис В.М., Ценч Ю.С. Аспекты цифровизации системы технологий и машин // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2019. N3(36). С. 40-45. EDN: RLCDHO.
5. Nassary E.K. Exploring the role of nature-based solutions and emerging technologies in advancing circular and sustainable agriculture: An opinionated review for environmental resilience. *Cleaner and Circular Bioeconomy*. Vol. 10.2025.100142. DOI: 10.1016/j.clcb.2025.100142.
6. Доржиев С.С., Базарова Е.Г., Розенблюм М.И. Биотехнологический комплекс для интеллектуального пастбищного животноводства в зоне пустынь и полупустынь с применением возобновляемых источников энергии // *Сельское хозяйство*. 2019. N1. С. 29-34. DOI: 10.7256/2453-8809.2019.1.30330.
7. Paul L. Greenwood. Review: An overview of beef production from pasture and feedlot globally, as demand for beef and the need for sustainable practices increase. *Animal*. Vol. 15. Suppl. 1. 2021. 100295. DOI: 10.1016/j.animal.2021.100295.
8. Rivero M.J., Lee M.R.F. A perspective on animal welfare of grazing ruminants and its relationship with sustainability. *Animal Production Science*. 2022. N 62. 1739-1748. DOI: 10.1071/AN21516.
9. Hoffmeister D., Curdt C., Lussem U. et al. Feasibility of UAV based low-cost monitoring in a horse grazed grassland. *Sustainable Meat and Milk Production from Grasslands*. 2018. N23. 857-859.
10. Нарбаев Ш. Научно-методические вопросы землеустройства объединений пастбищепользователей // *Ирригация и мелиорация*. 2017. N3(9). С. 66-68. EDN: YPMZNR.
11. Vertès F., Delaby L., Klumpp K., Bloor J. C–N–P uncoupling in grazed grasslands and environmental implications of management intensification. *Agroecosystem Diversity*. 2019. 15-34. DOI: 10.1016/B978-0-12-811050-8.00002-9.
12. Постолов В.Д., Радцевич Г.А. Организация культурных пастбищ, как элемент устойчивых и сбалансированных агроландшафтов // *Модели и технологии природообустройства (региональный аспект)*. 2017. N2(5). С. 54-60. EDN: EBKJKN.
13. Wang X., Zhu Ju., Cao L., Wang Sh. The status of foreign advanced pasture water supply technology. *IOP Series*. 2020. 525. 012063. DOI: 10.1088/1755-1315/525/1/012063.
14. Alaboodi A., Elminshawy N. Implementing of desalination system utilizing solar and subsurface condensation of humid air in arid region. *Journal of Innovative Engineering*. 2014. N2(3). 6. DOI
15. Zhu Ju., Wang X., Liu Yu. Research of the people and livestock drinking water technology with wind and solar energy mutual-complementing power. *IOP Series*. 2020. 525. 012062. DOI: 10.1088/1755-1315/525/1/012062.
16. Miyauchi Y., Isoda A., Li Zh., Wang P. Soybean cultivation on desert sand using drip irrigation with mulch. *Plant Production Science*. 2012. N15:4. 310-316. DOI: 10.1626/pss.15.310.
17. Лобачевский Я.П., Старовойтов С.И., Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С. Цифровые технологии в почвообработке // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2019. N1(30)/ С. 191-197. EDN: ZAWQJF.
18. Мазитов Н.К., Сахапов Р.Л., Шогенов Ю.Х. и др. Конкурентоспособный комплекс техники и технологии для производства зерна и кормов // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2019. Т. 20. N3. С. 299-308. DOI: 10.30766/2072-9081.2019.20.3.299-308.

### REFERENCES

1. Abdel Rahman M.A.E. An overview of land degradation, desertification and sustainable land management using GIS and remote sensing applications. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*. 2023. N34. 767–808 (In English). DOI: 10.1007/s12210-023-01155-3.
2. Lobachevskiy Ya.P., Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu.,

- Shogenov Yu.Kh. Scientific and technical achievements of agricultural engineering organizations in the context of digital transformation of agriculture. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023. 3(309). N2-12 2-11 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2023-3-2-11.
3. Lobachevskiy Ya.P., Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Shogenov Yu.Kh. Scientific and technical achievements of agricultural engineering organizations in the context of digital transformation of agriculture. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023. N4(310). 2-5 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2023-4-2-5.
4. Lobachevskiy Ya.P., Beylis V.M., Tsench Yu.S. Aspects of digitalization of the system of technologies and machines. *Electrical Technologies and Electrical Equipment in the Agro-Industrial Complex*. 2019. N3(36). 40-45 (In Russian). EDN: RLCDHO.
5. Nassary E.K. Exploring the role of nature-based solutions and emerging technologies in advancing circular and sustainable agriculture: An opinionated review for environmental resilience. *Cleaner and Circular Bioeconomy*. Vol. 10. 2025. 100142 (In English). DOI: 10.1016/j.clcb.2025.100142.
6. Dorzhiev S.S., Bazarova E.G., Rosenblum M.I. Biotechnological complex for intelligent pasture livestock farming in desert and semi-desert zones using renewable energy sources. *Agriculture*. 2019. N1. 29-34 (In Russian). DOI: 10.7256/2453-8809.2019.1.30330.
7. Greenwood P.L. Review: An overview of beef production from pasture and feedlot globally, as demand for beef and the need for sustainable practices increase. *Animal*. 2021. Vol. 15. Suppl. 1. 100295 (In English). DOI: 10.1016/j.animal.2021.100295. (In English).
8. Rivero M.J., Lee M.R.F. A perspective on animal welfare of grazing ruminants and its relationship with sustainability. *Animal Production Science*. 2022. N 62. 1739-1748 (In English). DOI: 10.1071/AN21516.
9. Hoffmeister D., Curdt C., Lussem U. et al. Feasibility of UAV based low-cost monitoring in a horse grazed grassland. *Sustainable meat and milk production from grasslands*. 2018. 23. 857-859 (In English).
10. Narbaev Sh. Scientific and methodological issues of land management of pasture user associations. *Irrigation and Melioration*. 2017. N3(9). 66-6 (In Russian). EDN: YPMZNR.
11. Vertès F., Delaby L., Klumpp K., Bloor J. C–N–P Uncoupling in Grazed Grasslands and Environmental Implications of Management Intensification. *Agroecosystem Diversity*. 2019. 15-34 (In English). DOI: 10.1016/B978-0-12-811050-8.00002-9.
12. Postolov V.D., Radceovich G. Organization of cultural pastures as element of the steady and balanced agrolandscapes. Models and Technologies. *Environmental Engineering (regional aspect)*. 2017. N2(5). 54-60 (In Russian). EDN: EBKJKH.
13. Wang X., Zhu J., Cao L., Wang Sh. The status of foreign advanced pasture water supply technology. *IOP Series*. 2020. 525. 012063 (In English). DOI: 10.1088/1755-1315/525/1/012063.
14. Alaboodi A., Elminshawy N. Implementing of desalination system utilizing solar and subsurface condensation of humid air in arid regions. *Journal of Innovative Engineering*. 2014. N2(3). 6 (In English). DOI
15. Zhu J., Wang X., Liu Yu. Research of the people and livestock drinking water technology with wind and solar energy mutual-complementing power. *IOP Series*. 2020. 525. 012062 (In English). DOI: 10.1088/1755-1315/525/1/012062.
16. Miyauchi Y., Isoda A., Li Zh., Wang P. Soybean cultivation on desert sand using drip irrigation with mulch. *Plant Production Science*. 2012. N15:4. 310-316 (In English). DOI: 10.1626/pp.15.310.
17. Lobachevsky Ya.P., Starovoitov S.I., Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S. Digital technologies in tillage. *Innovations in Agriculture*. 2019. N1(30). 191-197 (In Russian). EDN: ZAWQJF.
18. Mazitov N.K., Sakhapov R.L., Shogenov Yu.Kh. et al. Competitive complex of machinery and technologies for the production of grain and feed. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2019. Vol. 20. N3. 299-308 (In Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.2019.20.3.299-308.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Заявленный вклад соавторов:

Доржиев С.С. – постановка цели и задач исследования, идея и разработка инфраструктуры цифрового пастбища; общее руководство исследованиями;

Базарова Е.Г. – обзор и анализ источников, участие в разработке инфраструктуры цифрового пастбища, доработка текста, формулирование выводов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Coauthors' contribution:

Dorzhiev S.S. – formulation of the research objectives and tasks, conceptualisation and development of the digital pasture infrastructure, and overall supervision of the research;

Bazarova E.G. – literature review and analysis, contribution to the development of the digital pasture infrastructure, manuscript revision, and formulation of the study's conclusions.

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

01.04.2025

22.05.2025

EDN: LDMOSW

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-33-44



Научная статья

УДК 631.17



## Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур: структура данных и методы искусственного интеллекта

**Владимир Климентьевич Каличкин<sup>1</sup>,**

доктор сельскохозяйственных наук,

главный научный сотрудник,

e-mail: vk.kalichkin@gmail.com;

**Кирилл Юрьевич Максимович<sup>1</sup>,**

кандидат биологических наук, научный сотрудник,

e-mail: kiri-maksimovi@mail.ru;

**Ольга Александровна Алещенко<sup>2</sup>,**

младший научный сотрудник,

e-mail: oelab2@mail.ru;

**Виталий Викторович Алещенко<sup>3</sup>,**

доктор экономических наук, доцент,

e-mail: 564435@mail.ru

<sup>1</sup>Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, Новосибирская область, р.п. Краснообск, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН, Новосибирск, Российская Федерация;

<sup>3</sup>Новосибирский государственный аграрный университет, Новосибирск, Российская Федерация

*Статья подготовлена по плану НИР ИЭОПП СО РАН, проект «Движущие силы и механизмы развития кооперационных и интеграционных процессов в экономике Сибири», № 121040100279-5.*

**Реферат.** Интеллектуальное (умное) земледелие является современным этапом развития сельскохозяйственной науки и практики. Его характерная особенность заключается в активном применении методов искусственного интеллекта, в частности, машинного и глубокого обучения, при решении частных задач, направленных на устойчивое производство в растениеводстве. (*Цель исследования*) Целью данного исследования стал анализ структуры данных и сравнение алгоритмов машинного и глубокого обучения, используемых в прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур. (*Материалы и методы*) На основе конвергентного подхода с использованием методов когнитивного и семантического анализа авторами рассмотрена предметная область «Применение методов искусственного интеллекта при прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур», а также базовые аспекты, связанные со структурой исходных данных, основные этапы реализации предиктивных моделей и наиболее используемые методы машинного и глубокого обучения. (*Результаты и обсуждение*) По результатам работы представлены основная структура и способы получения данных, а также типовая схема реализации моделей в предиктивной аналитике урожайности сельскохозяйственных культур. Выделены наиболее распространенные методы машинного и глубокого обучения, подробно рассмотрены их функциональные особенности. На основе сравнительного анализа показано, что глубокое обучение и гибридные подходы превосходят традиционные методы машинного обучения по метрикам ошибок (точности прогнозирования). (*Выводы*) По результатам исследований установлено преимущество методов глубокого обучения ( $R_{\text{ср}}^2 = 0,85$ ) и гибридного подхода ( $R_{\text{ср}}^2 = 0,87$ ) в прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур в зависимости от складывающихся условий и управляющего воздействия. Развитием дальнейшей исследовательской работы может быть адаптация современных подходов искусственного интеллекта к пространственным объектам землепользования и культурам с преимущественным использованием данных дистанционного зондирования.

**Ключевые слова:** прогнозирование урожайности, интеллектуальное земледелие, искусственный интеллект, структура данных, машинное обучение, глубокое обучение.

■ **Для цитирования:** Каличкин В.К., Максимович К.Ю., Алещенко О.А., Алещенко В.В. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур: структура данных и методы искусственного интеллекта // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №2. С. 33-44. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-33-44. EDN: LDMOSW.

Scientific article

## Crop Yield Prediction: Data Structure and Ai-Powered Methods

**Vladimir K. Kalichkin<sup>1</sup>,**

Dr.Sc.(Eng.), chief researcher,

e-mail: vk.kalichkin@gmail.com;

**Kirill Yu. Maksimovich<sup>1</sup>,**

Ph.D.(Eng.), researcher,

e-mail: kiri-maksimovi@mail.ru;

**Olga A. Aleshchenko<sup>2</sup>**,  
junior researcher,  
e-mail: oelab2@mail.ru;

**Vitaliy V. Aleshchenko<sup>3</sup>**,  
Dr.Sc.(Eng.), associate professor,  
e-mail: 564435@mail.ru

<sup>1</sup>Siberian Federal Scientific Center of Agro-Bio Technology of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Novosibirsk Region, Russian Federation;

<sup>2</sup>Institute of Economics and Industrial Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation;

<sup>3</sup>Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, Russian Federation

*The article was prepared according to the research plan of the IEIE SB RAS, project «Driving forces and mechanisms for the development of cooperative and integration processes in the Siberian economy», No. 121040100279-5.*

**Abstract.** Smart farming, also known as intelligent agriculture, represents a modern stage in the development of agricultural science and practice. Its defining feature lies in the active application of artificial intelligence methods, particularly machine learning and deep learning, to address specific tasks aimed at ensuring sustainable crop production. (*Research purpose*) The aim of this study is to analyze data structures and compare machine learning and deep learning algorithms used in crop yield prediction. (*Materials and methods*) Using a convergent approach and applying methods of cognitive and semantic analysis, the authors examined the subject area of artificial intelligence applications in crop yield prediction. The study also explores key aspects related to the structure of input data, the main stages of implementing predictive models, and the most widely used machine learning and deep learning methods. (*Results and discussion*) The study presents the core data structure and methods for data acquisition, along with a typical workflow for implementing predictive analytics models for crop yield prediction. The most commonly used machine learning and deep learning methods are identified and their functional characteristics are examined in detail. Comparative analysis demonstrates that deep learning and hybrid approaches outperform traditional machine learning methods in terms of prediction accuracy, as measured by standard error metrics. (*Conclusions*) The findings confirm the advantages of deep learning methods (mean  $R^2 = 0.85$ ) and hybrid approaches (mean  $R^2 = 0.87$ ) in crop yield prediction under varying conditions and management interventions. Future research may focus on adapting modern AI approaches to spatial land use objects and crop types, with an emphasis on remote sensing data.

**Keywords:** crop yield prediction, smart farming, artificial intelligence, data structure, machine learning, deep learning.

■ **For citation:** Kalichkin V.K., Maksimovich K.Yu., Aleshchenko O.A., Aleshchenko V.V. Crop yield prediction: data structure and Ai-powered methods. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N2. 33-44 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-33-44. EDN: LDMOSW.

Эффективные рекомендации по возделыванию сельскохозяйственных культур необходимы с целью разработки и реализации плана развития растениеводства для повышения доходов товаропроизводителей и проведения импортно-экспортной политики. Методы прогнозирования урожая используются для того, чтобы предложить виды культур для выращивания на конкретном поле и агротехнические приемы управления продуктивностью посевов. Раннее и надежное прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур в масштабе поля может также служить целям страховой оценки.

Точное прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур зависит от таких факторов, как географическое положение, погодные условия, применяемые управляющие воздействия, а также от качества и количества исходных данных и выбранного подхода, используемого в предиктивной аналитике. С помощью анализа данных, машинного обучения и агрономических знаний создается

система рекомендаций по выращиванию культур – инструмент поддержки принятия решений для агрономов. Он помогает выбирать наилучшие культуры для выращивания, исходя из условий рельефа, типа почвы, вида агрокультуры, климата, доступных ресурсов и рыночного спроса, для реализации агротехнологий. В предыдущие годы урожайность сельскохозяйственных культур прогнозировалась с помощью статистических и механистических моделей. Модели, основанные на искусственном интеллекте, такие как модели машинного обучения и глубокого обучения, могут стать потенциальной заменой статистическому и механистическому моделированию, поскольку они дают возможность масштабировать результаты прогнозной аналитики и гораздо эффективнее обрабатывать сложные и нелинейные закономерности [1-3].

В России неплохо развита система прогнозирования урожайности в масштабе регионов (субъектов РФ) с использованием данных по метеопараметрам и дистанционному зондированию Земли.

Обычно анализируется временной ход *NDVI* по фазам вегетации, определяется теснота связи *NDVI* с урожайностью по этим периодам в комплексе с метеоусловиями. Затем формируются регрессионные модели прогнозирования на основе совместного использования наземных и спутниковых данных [4, 5]. В работе [6] по данным среднемесячной температуры воздуха, суммарного количества осадков и урожайности построена адаптивная нечетко-логическая модель анализа и прогноза урожайности озимой пшеницы. Разрабатываются также математические модели прогнозирования урожайности культур, основанные на агрохимических показателях почвы (гумус, обменный калий К, доступный фосфор Р и рН солевой вытяжки) [7]. Осуществляются попытки создания методики прогнозирования урожайности на основе использования эконометрических инструментов. Например, показано, что на урожайность сельскохозяйственных культур оказывают влияние социально-экономические и технологические факторы, а также высокая доля освоенных под посевы территорий [8].

В мировой практике при прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур широко применяются методы искусственного интеллекта, в частности, машинное обучение [9]. В отечественной предиктивной аналитике в этой предметной области исследования по применению машинного обучения имеют ограниченное развитие. В качестве примера можно привести исследование по применению 8 алгоритмов машинного обучения [10]. Установлено, что *Random Forest*, *Gradient Boosting* и *Neural Networks* были более эффективными в задачах прогнозирования урожайности по сравнению с алгоритмами *K-Nearest Neighbors*, *Decision Trees*, *Support Vector Machines*. Имеются также работы с использованием моделей глубокого обучения, в частности, искусственная нейронная сеть (ИНС) с алгоритмом обратного распространения ошибки [11]; ИНС в форме многослойного персептрона (*MLP*) [12, 13]; *MLP*, радиальные базисные функции (*RBF*) и обобщенно-регрессионная нейронная сеть (*GRNN*) [14].

В то же время в эпоху цифровых технологий в сельском хозяйстве применение машинного обучения открывает широкие возможности получения более точных прогнозов урожайности культур в условиях растущего количества данных. Выбор метода или подхода машинного обучения при прогнозировании зависит от многих сопутствующих условий. Прежде всего, это доступность и структура данных, методов и источников их получения, профессиональная подготовка исследователя, доступность программного обеспечения и др. В связи с этим целесообразно кратко рассмотреть мировые тенденции в отношении научного обеспечения проблемы.

**Цель исследования** – анализ структуры данных и сравнение алгоритмов машинного и глубокого обучения, используемых в прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур.

**Материалы и методы.** Общеметодологической основой исследований служил метод обобщения – способ познания посредством определения общих существенных признаков определенной предметной области (ПрО). В нашем случае ПрО формулировалась как «применение машинного обучения при прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур». Обобщение базировалось на анализе и синтезе научных публикаций отечественных и зарубежных авторов, направленных на установление и сравнение существенных признаков ПрО. Также использован конвергентный подход с применением методов когнитивного и семантического анализов. В этом исследовании использовались базы данных *Web of Science*, *Scopus*, *Science Direct*, *Springer Link*, *Google Scholar*, *elibrary.ru*, *cyberleninka.ru* и др. Применялось индуктивное обобщение (от единичного достоверного к общему вероятностному), которое предполагает определение общих существенных признаков ПрО и фиксирование их в форме суждений.

Также выполнено сравнение эффективности различных методов машинного обучения, глубокого обучения и гибридных моделей на основе коэффициента детерминации ( $R^2$ ). График оценки точности моделей (рис. 4) выполнен в формате «ящик с усами» для визуализации распределения значений  $R^2$ . «Ящик» показывает межквартильный размах (от 25- до 75-го перцентиля), где горизонтальная линия внутри «ящика» представляет медиану. «Усы» указывают на минимальные и максимальные значения, исключая выбросы. Отдельные точки за пределами «усов» представляют статистические выбросы.

Для обобщения точности прогнозных моделей машинного обучения использованы вариационно-статистические методы средствами языка программирования для статистической обработки данных в интегрированной среде разработки *R-Studio*. Дополнительные графические построения выполнялись в программном пакете *Draw.IO* (*app.diagrams.net*).

**Результаты и обсуждение.** Участие в формировании урожая взаимосвязанных факторов и условий окружающей среды, чаще всего недоопределенных, существование возмущений в реальных системах с сильно нелинейными явлениями делает задачу прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур очень сложной и может вызывать ошибки моделирования. Погодные условия влияют на рост растений на различных стадиях, приводя к значительным годовым и межгодовым

колебаниям урожайности. Кроме того, пространственная изменчивость свойств почвы, а также чередование культур (севообороты), системы обработки почвы и удобрений, развитие вредных организмов и применяемые агротехнологии увеличивают сложность прогнозирования урожайности.

Разработка точного и эффективного метода прогноза требует правильной оценки этих условий и факторов, что возможно путем их мониторинга и проведения экспериментов по выращиванию сельскохозяйственных культур. То есть, анализ длительных временных рядов полевых опытов научных и учебных учреждений дает наиболее правдоподобный прогноз, но который не может быть реализован без дополнительного формирования параметров признаков географических объектов (например, видов земель различной территориальной принадлежности) для использования в прогнозном моделировании в пространственном масштабе. Для внутрихозяйственного использования методов прогнозирования урожайности большее значение имеют также данные по ее историческим записям на каждом поле.

В мировой предиктивной аналитике существует два основных подхода для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур (рис. 1). В первом подходе используются математические модели, называемые моделями процессов или моделями роста сельскохозяйственных культур (механистические модели). Эти модели могут использоваться для представления разнообразных взаимодействий физиологических процессов растений с окружающей средой для оценки потенциала производства биомассы и обеспечивают абстрактное представление о реализации динамического поведения физиологических стадий развития растений.



Рис. 1. Подходы к прогнозированию урожайности сельскохозяйственных культур

Fig. 1. Approaches to crop yield prediction

Фактические данные и различные предположения о типах почв, солнечной радиации, изменении осадков и температуры, различных управляющих воздействиях, служат исходным материалом для моделей роста растений. В основном механистические модели ориентированы на конкретные культуры. В качестве примера можно привести APSIM, DSSAT, STICS, WOFOST, CropSyst, AGROTOOL и другие модели. Признается, что эти модели спо-

собны к высокоточному прогнозированию урожайности, но требуют обширных входных данных. Несмотря на эффективность, такого рода модели обычно оказываются слишком дорогостоящими и трудозатратными, поэтому непрактичны для массовых приложений в растениеводстве.

Во втором подходе используются модели, управляемые данными. Этот подход, иногда называемый эмпирическим, сравнительно более прост в использовании, чем модели роста сельскохозяйственных культур. При этом подходе рассматриваются данные об урожайности культур за несколько лет, полученных по историческим данным хозяйства или полевым опытам, либо с помощью дистанционного зондирования. На основе этих данных определяется набор признаков, наиболее способствующих изменению урожайности. Принимая эти эффективные признаки как независимые, а урожайность как зависимую переменную, применяются различные варианты моделирования прогноза. Такие методы относительно менее затратные и простые в применении, а также для них не требуется никакой предварительной информации о различных физиологических процессах, участвующих в росте растения.

Этот подход также делится на два направления: статистическое моделирование и машинное обучение (МО). Наиболее распространенными были статистические модели, основанные на уравнениях регрессии между урожайностью и агрометеорологическими параметрами, такими как температура, количество осадков, влажность почвы и др. В свое время они наиболее широко использовались для формулирования соответствующих рекомендаций. Каждая статистическая модель определяет один набор параметров.

Однако были и модели, основанные на других подходах. Примерами могут служить модели: на основе составных погодных индексов; дискриминантных функций; метода водного баланса; индексов роста; вероятности модели цепи Маркова; логистических моделей; на основе детерминированной урожайности с использованием ARIMA и др. Однако сложность с этими моделями прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур заключается в требовании большого объема полевых данных для их параметризации и калибровки.

Машинное обучение рассматривается как подмножество искусственного интеллекта (ИИ). Оно создает самообучающуюся математическую модель на базе данных, известных как «обучающие данные», для прогнозирования. Алгоритмы МО, в отличие от традиционных статистических моделей, интерпретируют выходную переменную как неявную функцию входных параметров, которые могут быть сложными и выполняют решение зада-

чи без явного программирования. При этом всегда возникает необходимость более точного и надежного выделения пространственно-временных признаков, которые обычно извлекаются при участии человека (в моделях глубокого обучения – ГО участие человека ограничивается выбором архитектуры нейронной сети и подготовкой данных).

Однако, в отличие от традиционных статистических методов, МО не делает предположений о правильной структуре модели данных, такой как функциональная форма и распределение вероятностей. Вместо этого методы МО позволяют изучать взаимосвязь между зависимыми и независимыми переменными на основе данных и базируются на полупараметрических и непараметрических структурах. В контексте прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур с несколькими исходными данными применение таких методов позволило создать модели прогноза более высокой точности.

В свою очередь, эти модели делятся на модели МО и ГО.

В моделях МО обычно используются алгоритмы: дерево решений (*Decision Trees – DT*), метод опорных векторов (*Support Vector Machines – SVM*), цепи Маркова (*Markov Chain Correlation – MCC*), к-ближайший сосед (*K-Nearest Neighbors – KNN*), случайный лес (*Random Forest – RF*), наивный байесовский классификатор (*Naïve Bayes classifier – NB*), градиентный бустинг (*Gradient Boosting – GB*), адаптивный бустинг (*Adaptive Boosting – AdaBoost*), экстремальный градиентный бустинг (*eXtreme Gradient Boosting – XGBoost*), искусственная нейронная сеть (*Artificial Neural Network – ANN*), классические регрессионные модели (*Regression Models – RM*) и др.

В моделях ГО используются: сверточная нейронная сеть (*Convolutional Neural Network – CNN*), рекуррентная нейронная сеть (*Recurrent Neural Network – RNN*), глубокая нейронная сеть (*Deep Neural Networks – DNN*), спайковая нейронная сеть (*Spiking Neural Network – SNN*), долговременная и кратковременная память (*Long-Short Term Memory – LSTM*) и др.

Сбор данных имеет решающее значение как по качеству, так и по размеру для получения точных результатов при моделировании прогнозов. Выбор подходящих признаков и их переменных является очень важной частью любых алгоритмов МО. Чаще всего в моделях как МО, так и ГО используются признаки, отражающие агрометеорологические ресурсы местности в течение вегетационного периода, характеристики почвы, состояние посевов по стадиям роста растений и применяемые управляющие воздействия на агрофитоценоз (рис. 2).

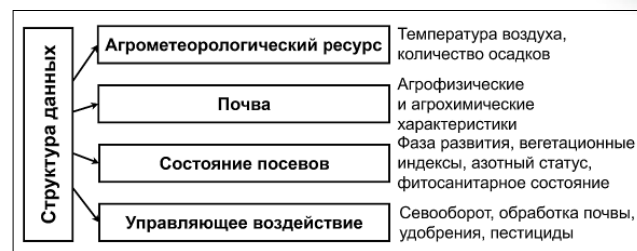


Рис. 2. Основные признаки, используемые в машинном обучении при прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур

Fig. 2. Main features used in machine learning for crop yield prediction

Группа признаков «агрометеорологический ресурс» включает информацию о погоде, которая собирается с помощью полевых метеостанций, и данные о температуре воздуха и почвы, влажности воздуха и почвы, скорости и направлении ветра, количестве осадков и о сумме активных температур. Данные о погоде могут быть использованы также из различных источников, например, цифровых глобальных баз данных по агрометеорологическим параметрам. В качестве примеров можно привести наиболее распространенные базы с открытым доступом: ERA Interim (<https://www.ecmwf.int>), NCEP/NCAR (<http://www.esrl.noaa.gov>) – открытые мировые базы данных реанализов; World Clim (<https://www.worldclim.org>) – мировая база данных климата; Climate Data Online (<https://www.nccl.noaa.gov>) – архив глобальных исторических данных о погоде и климате; Погода и климат (<http://www.pogodaiklimat.ru>) – отечественная база данных климата, содержащая многолетний архив погоды по всему миру.

Группа признаков «почва» состоит из переменных: почвенные карты, тип почвы, значение pH, питательные вещества (азот, фосфор, калий, магний, сера, цинк, бор, кальций, марганец), влажность почвы, структурное состояние, залегание в рельефе, местоположение в качестве географического объекта и др. Информацию о почве получают путем оцифровки почвенных карт на бумажных носителях, по материалам дистанционного зондирования спутниками и беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), а также с помощью нативных датчиков. Валидация этих переменных осуществляется обычно путем полевого обследования и проведения агрохимических и агрофизических лабораторных анализов.

Группа признаков «состояние посевов» относится к информации о культуре, такой как биомасса, прирост в процессе выращивания, густота травостоя, проективное покрытие и др., которые определяются с помощью полевых обследований и вегетационных индексов. Обычно используется NDVI, расчет которого базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участ-

ках спектральной кривой отражения растительностью. В красной области спектра (0,6-0,7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом растений, а в инфракрасной области (0,7-1,0 мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа. Отношение этих показателей друг к другу позволяет четко отделять растительность от прочих природных объектов и анализировать ее состояние. В эту группу также включаются другие показатели, указывающие на рост, например, индекс площади листьев, азотный статус посевов и развитие вредителей и болезней.

В группе признаков «управляющие воздействия» могут быть предыдущие данные об урожайности (временные ряды), годе, площади возделывания. Также используются данные фитосанитарного и агрохимического обследования, чередования культур во времени на поле, применения удобрений и средств защиты растений (пестицидов), приемов обработки почвы, сроков посева и других агротехнических показателей.

Использование в анализе более одного набора данных из разных источников как правило обеспечивает более высокий процент успеха прогнозирования.

Типовая схема реализации моделей машинного обучения при прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур состоит из четырех основных этапов (рис. 3).

**Первый этап** – сбор данных описан выше.

**Второй этап** – предварительная обработка данных существенно влияет на эффективность работы моделей МО. Этот этап включает серию операций, направленных на устранение шума и генерацию высококачественных данных, подходящих для обучения модели. Ключевые цели этапа включают: достижение баланса данных для уменьшения смещения, выполнение преобразований данных и устранение нерелевантных данных. Этап предварительной обработки данных связан также с выбором соответствующих признаков для использования в последующем анализе.

Значимые признаки и их переменные выбираются из обучающих данных с использованием различных статистических критериев, например, оценки прироста информации, коэффициента прироста информации, снижения коэффициента Джини, дисперсионного анализа, хи-квадрат, алгоритма *ReliefF* (алгоритм выбора признаков ранговой важности) и *FCBF* (быстрый фильтр на основе корреляции для выбора признаков). Ведутся также поиски новых методов по выбору релевантных признаков, особенно в моделях ГО, где количество признаков и переменных может насчитываться десятками при анализе больших данных. Например, описан новый подход оптимального выбора признаков, в котором извлекаются функции более высокого порядка,



Рис. 3. Типовая схема реализации моделей машинного обучения при прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур

Fig. 3. Typical architecture for implementing machine learning models in crop yield prediction

улучшенные энтропийные функции и функции, основанные на корреляции в работе [15]. Затем выбираются оптимальные функции из этого набора с помощью алгоритма *IBS-BOA* (*IBS* – эволюционный алгоритм с использованием роевого интеллекта стаи птиц, а *BOA* – алгоритм оптимизации «бабочка»). *CNN* обучается с помощью алгоритма *IBS-BOA*. Парные положительные корреляции между различными признаками помогают удалять высокоррелированные признаки, поскольку они снижают прогностический потенциал модели. Для уменьшения размерности данных может быть использован анализ главных компонент (*principal component analysis, PCA*).

Управление значениями осуществляется путем исключения строки или выбора определенного постоянного значения для заполнения строки, или путем добавления известного среднего значения, которое определяется на основе выбранного признака. В некоторых случаях категориальные значения, которые представлены в виде строковых констант, преобразуются в целочисленные значения, чтобы модель могла их легко интерпретировать. Разделение данных на обучение и тестирование осуществляется в стандартном соотношении 80:20, где 80% данных учитывается для обучения модели и 20% для тестирования (могут быть варианты 70:30%).

**Третий этап** состоит из выбора алгоритма МО, обучения и тестирования модели с использованием обучающих и тестовых данных.

**Четвертый этап** – оценка точности модели.

Для оценки точности моделей используют набор метрик, охватывающий различные аспекты производительности моделей. Среднеквадратичная ошибка ( $RMSE$ ) и средняя абсолютная ошибка ( $MSE$ ) позволяют оценить общую точность прогнозов, при этом  $RMSE$  выражается в тех же единицах, что и целевая переменная. Средняя абсолютная ошибка ( $MAE$ ) и среднее абсолютное отклонение ( $MAD$ ) предоставляют информацию о средней величине ошибок прогноза.

Для оценки относительной точности прогноза используют среднюю абсолютную ошибку в процентах ( $MAPE$ ), среднюю относительную ошибку в процентах ( $MRPE$ ), среднюю процентную ошибку ( $MPE$ ), а также специализированные метрики  $AMAPE$  и  $SMAPE$ , отражающие отклонения средних и суммарных значений, соответственно. Нормализованная среднеквадратичная ошибка ( $NRMSE$ ) и среднеквадратичная логарифмическая ошибка ( $RMSLE$ ) дополнительно учитывают масштаб и распределение данных. Для оценки монотонности связи между прогнозируемыми и фактическими значениями применяют коэффициенты ранговой корреляции Кендалла ( $Kendall\ Tau$ ) и Спирмена ( $Spearman\ Corr$ ). Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) используют для оценки доли дисперсии зависимой переменной, объясняемой моделью.

Большинство алгоритмов машинного обучения решают задачи как классификации, так и регрессии. При использовании метода опорных векторов ( $SVM$ ) обычно применяются исторические данные, где выбранные характеристики служат входными данными, а целевой переменной выступает урожайность. Целью  $SVM$  является установление оптимальной границы принятия решения, которая эффективно различает уровни урожайности.

Цепи Маркова (*Markov chain correlation – MCC*) – это математическая модель, представляющая собой последовательность расчетов, где вероятность наступления каждого события зависит только от состояния, достигнутого в предыдущем событии. Характеризуется тем, что, при текущем состоянии системы, ее будущее состояние не зависит от прошлого, а опирается на происходящее сейчас.

Алгоритм К-ближайшего соседа ( $KNN$ ) представляет собой простой метод контролируемого машинного обучения. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур, неизвестного значения признака, может быть выполнено путем использования значений ближайших известных соседей. Это достигается путем вычисления евклидова расстояния между точками данных.

Алгоритм дерево решений ( $DT$ ) также представляет собой метод контролируемого машинного обучения. Структура этого классификатора напоминает дерево, где каждый конечный узел пред-

ставляет результат, ветви демонстрируют правила принятия решений, а основные узлы отражают свойства набора данных.

На этапе обучения алгоритм  $DT$  определяет оптимальный признак для сегментации данных, используя метрику, такую как энтропия, или индекс Джини (примесь). Эти метрики измеряют уровень беспорядка или разнообразия в подмножествах данных. Цель состоит в том, чтобы точно определить особенности, которые дают максимальный прирост информации или минимальные примеси после разделения. Значения корневых признаков сравниваются с атрибутами записи. На основе этой оценки выполняется соответствующая ветвь, связанная с этими данными, направляя переход к следующему узлу.

Работа алгоритма случайный лес ( $RF$ ) основана на создании деревьев решений и заданных данных. Каждое дерево распространяет прогнозы, и алгоритм принимает оптимальное решение в процессе голосования. Поскольку результаты здесь усредняются перед принятием решения, это всегда эффективнее, чем вывод отдельного дерева решений.

Наивный байесовский классификатор ( $NB$ ) вычисляет вероятность того, что событие произойдет, учитывая истинность другого события. Мультиномиальные алгоритмы, а также Гаусса и Бернулли составляют три наивных метода Байеса.

Искусственная нейронная сеть ( $ANN$ ) – это вычислительную модель с  $N$  количеством узлов (или нейронов), соединенных друг с другом. Каждый узел представляет собой определенную выходную функцию, называемую функцией активации. Связь между каждыми двумя узлами представляет собой вес для сигнала, проходящего через связь, который эквивалентен памяти  $ANN$ . Выход сети будет варьироваться в зависимости от того, как связана сеть, значения веса и функции стимулирования. На обучающем множестве происходит обучение нейронной сети. На тестовом и контрольных множествах осуществляется проверка построенной модели. При обучении и тестировании синаптические веса и смещения выбираются таким образом, чтобы минимизировать ошибку обучения.

Ансамблевые алгоритмы МО, такие как градиентный бустинг ( $GB$ ), адаптивный бустинг ( $AdaBoost$ ) и экстремальный градиентный бустинг ( $XGBoost$ ) используются с целью объединения прогнозов нескольких моделей МО для повышения точности и надежности.

В градиентном бустинге каждый последующий метод обучается уменьшать функцию потерь. Метод вычисляет градиент процедуры потерь по отношению к расчетам, выполненным текущим ансамблем для каждого процесса. Впоследствии он готовит новую слабую модель для уменьшения это-

го градиента. Вычисления, произведенные с помощью этой методики, включаются в совокупность, и эта итерационная процедура продолжается до достижения заранее определенного конечного условия.

Адаптивный бустинг принадлежит к группе ускоряющих классификаторов. Его основная цель – повысить точность классификатора за счет интеграции нескольких слабых классификаторов. Фундаментальный принцип *AdaBoost* заключается в корректировке весов классификаторов и итеративном обучении выборок данных.

Экстремальный градиентный бустинг – это масштабируемая и точная реализация градиентного бустинга, специально разработанная для использования потенциала вычислительных мощностей для расширенных древовидных алгоритмов. Алгоритм революционизирует построение деревьев, используя параллельную обработку вместо последовательных методов. Используя стратегию по уровням, он эффективно оценивает качество потенциальных различий в обучающей выборке путем сканирования значений градиента и использования частичных сумм.

Модели глубокого обучения представляют собой значительный прогресс в подотрасли МО. Наиболее существенными аспектами методов ГО является автоматическое извлечение признаков и высокая производительность. Они представляют собой производную от архитектур искусственных нейронных сетей, отличающуюся своими иерархическими структурами обучения с множеством взаимосвязанных уровней. Каждый уровень в этой структуре отвечает за извлечение различных фрагментов информации из анализируемых данных. Эти уровни могут напрямую обрабатывать необработанные или слегка обработанные исходные данные (включая обработку данных дистанционного зондирования высокого разрешения, особенно снимков с БПЛА), автономно определяя необходимые функции для поставленных задач. Эта возможность устраняет необходимость в ручном извлечении признаков, что обычно требуется в традиционных методах МО, оптимизируя таким образом рабочий процесс обработки данных и повышая квалификацию модели в распознавании сложных закономерностей.

Сверточная нейронная сеть (*CNN*) обрабатывает данные в формате нескольких массивов, таких как одномерные данные (сигналы и последовательности), двумерные данные (изображения) и трехмерные данные (видео) и позволяет автоматически извлекать признаки из каждого обработанного пикселя изображения во время обучения. Каждая единица на карте объектов имеет одинаковый вес и занимает лишь небольшую часть выборки изображений, что делает *CNN* более практичными и подробными, чем обычные нейронные сети. Мо-

дель *CNN* обычно состоит из сверточных и объединяющих слоев, за которыми следует несколько полностью связанных слоев. *CNN* имеют некоторые конструктивные параметры, включая количество фильтров, размер фильтра, тип заполнения и шаг.

Рекуррентная нейронная сеть (*RNN*) используется для задач, связанных с последовательными данными, чтобы зафиксировать их временные зависимости. *RNN* хранит историю всех прошлых элементов последовательности в своих скрытых единицах, называемых вектором состояния, и использует эту информацию при обработке входной последовательности по одному элементу за раз. *RNN* – это очень мощные модели для моделирования последовательности, но их обучение бывает очень сложной задачей из-за проблем с исчезновением или резким увеличением градиента. Для решения этой проблемы *RNN* улучшаются с помощью ячеек долговременной и кратковременной памяти (*LSTM*), которые представляют собой тщательно спроектированные рекуррентные нейроны, обеспечивающие хорошую производительность в широком спектре приложений моделирования последовательностей. Ячейки *LSTM* используют специальный блок, называемый ячейкой памяти, для длительного запоминания входных данных и предотвращения проблемы исчезающего градиента.

Глубокая нейронная сеть (*DNN*) – это модель, которая связывает веса для входных данных (нейронов), а выходной информацией обычно является функция активации (*ReLU*, *Softmax*). На каждом уровне входные данные преобразуются, и между слоями, которые не являются последовательными, не может быть обнаружено прямой связи. Для оптимизации параметров сети используется обратное распространение. Каждое обновление сети выполняется для полного обучающего набора данных, называемого эпохой. Используемое количество эпох может существенно колебаться. Сеть обучается до тех пор, пока точность проверки не достигнет максимума или не начнет падать, чтобы избежать переобучения.

Спайковая нейронная сеть (*SNN*) – это третье поколение моделей нейронных сетей, которая относится к подтипу *ANN* с существенными отличиями в самой архитектуре. Спайковые нейронные сети не имеют общей линейной структуры, а сама сеть строится с использованием определенных топологических цепочек. Вместо прямых слоев использует более сложные структуры, такие как петли или разнонаправленные связи, для передачи и обработки данных между ключевыми элементами структуры сети. Для *SNN* характерно инкрементное обучение – возможность оперативно учитывать поступающую новую информацию в режиме реального времени и тут же использовать ее в процессе обучения. Асинхронность в *SNN* имитирует

поведение биологических нейронных сетей, где существует большая степень параллелизма и случайности в обработке входящего потока информации.

Долговременная и кратковременная память (*LSTM*) – это расширение *RNN*, разработанное для уменьшения проблемы долгосрочной зависимости. В отличие от *RNN*, *LSTM* может запоминать данные в течение длительных периодов. В архитектуре *RNN* скрытые слои имеют простую структуру (например, один слой *tanh*), в то время как архитектура *LSTM* более сложная. Она состоит из четырех скрытых слоев. Основным компонентом *LSTM* является состояние ячейки. Чтобы добавить или удалить информацию из состояния ячейки, используются вентили для ее защиты с использованием сигмоидальной функции.

В последнее время получило развитие также использование для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур гибридных моделей. Например, комбинации: сверточные нейронные сети (*CNN*) – глубокие нейронные сети (*DNN*), *CNN* – *XGBoost*, *CNN* – рекуррентные нейронные сети (*RNN*) и *CNN* – долгосрочная краткосрочная память (*LSTM*) [15-17].

Для определения эффективности модели используют различные метрики ошибок, перечень которых показан выше, однако наиболее распространенными являются *RMSE*, *MAE* и  $R^2$ . Сравнение двух первых метрик ошибок осложняется доступностью исходного набора данных и различными единицами измерения, которые выражены в абсолютных или относительных величинах (% , кг/га, ц/га, т/га и др.), поэтому для сравнительной стандартизации предиктивной эффективности моделей

нами был использован коэффициент детерминации  $R^2$ . С помощью обобщения современных литературных источников [1-5, 9, 10, 15-20], проведена оценка точности моделей (предиктивные характеристики) на основе  $R^2$  (рис. 4).

Традиционные методы машинного обучения (например, *SVM*, *KNN*, *DT*) демонстрируют умеренную эффективность (значения  $R^2$  находилось преимущественно в диапазоне от 0,50 до 0,70). Методы на основе регрессии имели схожие предиктивные характеристики (средний  $R^2 = 0,58$ ) и наибольший разброс значений, что говорит о недостаточной предиктивной способности данного подхода. Модели градиентный бустинг (*GB*), адаптивный бустинг (*AdaBoost*) и экстремальный градиентный бустинг (*XGBoost*) обладали самой высокой точностью среди традиционных методов МО (значения  $R^2$  находились преимущественно в диапазоне 0,70-0,85).

Методы глубокого обучения демонстрировали более высокую эффективность относительно традиционных методов МО (значения  $R^2$  находились преимущественно в диапазоне 0,75-0,95). Значения  $R^2$  в моделях *RNN*, *SNN* и *DNN* находились преимущественно в диапазоне от 0,80 до 0,90 ( $R_{ср}^2 = 0,85$ ). Наивысшие показатели точности достигались при реализации *SNN* и *DNN* (максимальные значения  $R^2$  составляли 0,95 и 0,94 соответственно).

Гибридные модели также демонстрировали высокую предиктивную эффективность ( $R_{ср}^2 = 0,87$ ), например, в моделях *CNN-DNN* значения  $R^2$  находились преимущественно в диапазоне от 0,79 до 0,92. Однако среди гибридных подходов максимальные значения  $R^2$  (0,95) достигались с помощью модели *CNN-XGBoost*.

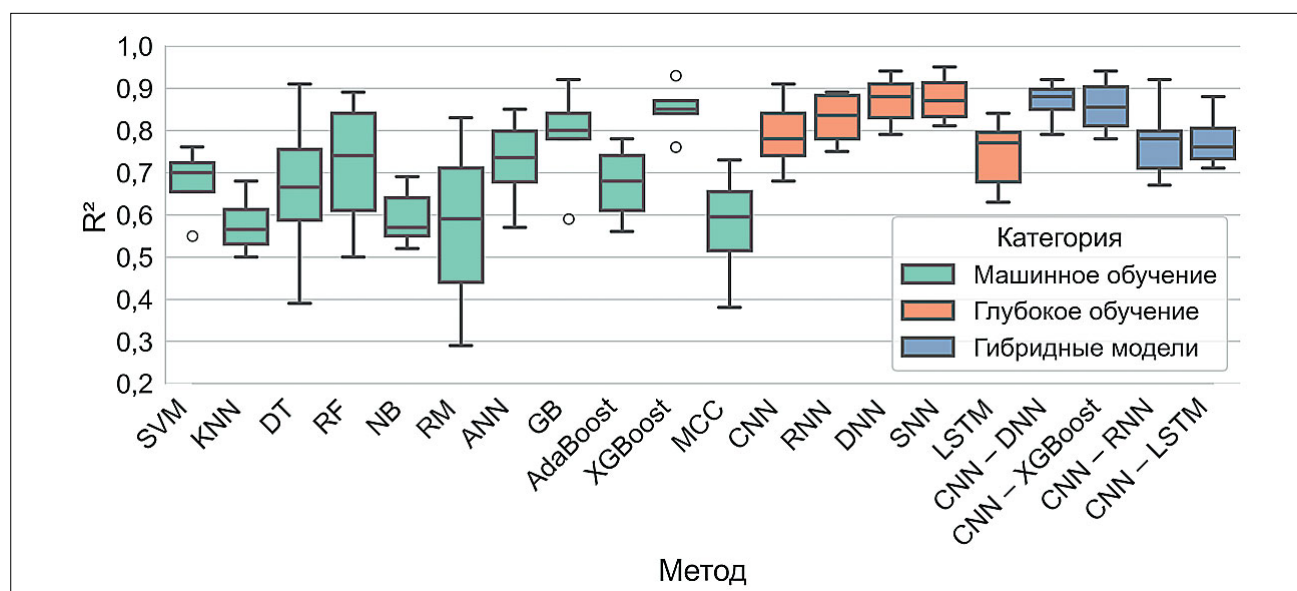


Рис. 4. Сравнение эффективности различных моделей прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур на основе  $R^2$

Fig. 4.  $R^2$ -based comparison of crop yield prediction models

Необходимо учесть, что каждый случай построения предиктивной модели уникален и характеризуется определенным набором параметров и доступных данных. Доступность данных, их качество и выбор метода с учетом имеющихся данных имеет решающее значение в предиктивной эффективности моделей. Так, при использовании данных онлайн-платформы *Kaggle* и интернета вещей (*IoT*) точность прогнозирования урожайности различных культур достигала 99,59% с использованием алгоритма сети Байеса (*Bayes Net*) и 99,46% с использованием алгоритмов наивного байесовского классификатора (*NB*) и дерева Хеффдинга (*Hoeffding Tree*) [20].

Развитием исследовательской работы в этой предметной области может быть адаптация современных подходов искусственного интеллекта к анализу специфики пространственных объектов землепользования в географическом контексте и районированных культур на основе преимущественного использования данных дистанционного зондирования и интернета вещей. Актуальными остаются также исследования, направленные на решение проблемы «ограниченности данных» и интерпретации результатов глубокого обучения для преодоления эффекта «черного ящика» нейронных сетей с помощью объяснимого искусственного интеллекта.

**Выводы.** Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур может быть достигнуто с использованием широкого спектра методов искусственного интеллекта. Способность этих методов обрабатывать историческую и актуальную информацию о погоде, плодородии почв и фитосанитарном состоянии посевов повышает точность прогнозов урожайности. В большинстве случаев в

предиктивных моделях используются признаки, отражающие агрометеорологические ресурсы местности в течение вегетационного периода, характеристики почвы, состояние посевов по стадиям роста растений и применяемые управляющие воздействия на агрофитоценоз.

Реализация моделей машинного обучения (МО) при прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур состоит из четырех этапов: сбор данных; предварительная обработка и анализ данных; построение предиктивных моделей; оценка точности моделей. Ключевые этапы (предварительная обработка и анализ данных, а также построение предиктивных моделей) связаны с будущей эффективностью прогнозирования. Предварительная обработка данных, которая заключается в выполнении преобразований данных и устранении нерелевантных признаков, существенно влияет на эффективность работы предиктивных моделей. После определения релевантных признаков происходит процесс выбора алгоритма с последующим обучением и оптимизацией модели, в том числе за счет настройки гиперпараметров. Выбор модели машинного обучения для успешного прогнозирования урожайности существенно зависит от выбора релевантных признаков и их параметров (данных), а также от функциональных возможностей алгоритмов.

На основе сравнительного анализа установлено, что методы глубокого обучения демонстрируют высокую эффективность прогнозирования ( $R_{cp}^2 = 0,85$ ) относительно традиционных методов машинного обучения ( $R_{cp}^2 = 0,58$ ). Гибридные подходы превосходят все традиционные методы машинного обучения и сравнимы с методами глубокого обучения по величине  $R^2$  и разбросов его значений ( $R_{cp}^2 = 0,87$ ).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Bali N., Singla A. Emerging trends in machine learning to predict crop yield and study its influential factors: A survey. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2022. N29. 95-112. DOI: 10.1007/s11831-021-09569-8.
2. Shingade S.D., Mudhalwadkar R.P. Analysis of crop prediction models using data analytics and ML techniques: a review. *Multimedia Tools and Applications*. 2024. N83. 37813-37838. DOI: 10.1007/s11042-023-17038-6.
3. Meghraoui K., Sebari I., Pilz J. et al. Applied deep learning-based crop yield prediction: a systematic analysis of current developments and potential challenges. *Technologies*. 2024. 12. N4. 43. DOI: 10.3390/technologies12040043.
4. Степанов А.С., Асеева Т.А., Дубровин К.Н. Построение и оценка точности регрессионных моделей для определения урожайности зерновых и зернобобовых культур на основе данных дистанционного Земли и климатических характеристик // *ИнтерКарто. ИнтерГИС*. 2020. 26. N3. С. 159-169. DOI: 10.35595/2414-9179-2020-3-26-159-169.
5. Страшная А.И., Береза О.В., Кланг П.С. Прогнозирование урожайности зерновых культур на основе комплексирования наземных и спутниковых данных в субъектах Южного федерального округа // *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2021. N2 (380). С. 111-137. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-2-111-137.
6. Бисчоков Р.М., Ахматов М.М. Анализ и прогноз урожайности сельскохозяйственных культур методами нечеткой логики // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2021. N168. С. 274-287. DOI: 10.21515/1990-4665-168-020.
7. Благов Д.А., Митрофанов С.В., Никитин В.С. и др. Математические модели и программный комплекс по прогнозированию урожайности сельскохозяйственных культур // *Агротехника и энергообеспечение*. 2019. N3 (24). С. 182-188. EDN: OMWNXT.

8. Архипова М.Ю., Смирнов А.И. Современные направления прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур на основе использования эконометрических моделей // *Вопросы статистики*. 2020. 27. N5. 65-75. DOI: 10.34023/2313-6383-2020-27-5-65-75.
9. Momenpour S.E., Bazgeer S., Moghbel M. A bibliometric analysis of the literature on crop yield prediction: insights from previous findings and prospects for future research. *International Journal of Biometeorology*. 2024. 68. 829-842. DOI: 10.1007/s00484-024-02628-2.
10. Макеев К.А., Греченева А.В., Котов Я.С. и др. Сравнение эффективности алгоритмов машинного обучения в задачах прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023. N2. С. 203-206. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-2-203-206.
11. Дудко Ю.В., Маринкин Е.Б., Владимирова Т.М. Применение нейросетевых технологий в предсказании плодородия почв с зернобобовыми культурами и прогнозировании их урожайности // *Вопросы науки: инноватика, техника и технологии*. 2019. N1. С. 67-72. EDN: YXPXCX.
12. Рогачев А.Ф. Системный анализ и прогнозирование временных рядов урожайности на основе автокорреляционных функций и нейросетевых технологий // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2018. N3 (51). С. 309-316. EDN: VOQSWI.
13. Рогачев А.Ф., Мелихова Е.В. Адаптация алгоритмов и обоснование инструментария для нейросетевого прогнозирования урожайности агрокультур с использованием ретроспективных данных // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2020. N1(57). С. 290-302. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-01-29.
14. Бисчоков Р.М. Анализ, моделирование и прогноз урожайности сельскохозяйственных культур средствами искусственных нейронных сетей // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство*. 2022. 17. N2. С. 146-157. DOI: 10.22363/2312-797X-2022-17-2-146-157.
15. Boppudi S. J S. Deep ensemble model with hybrid intelligence technique for crop yield prediction. *Multimedia Tools and Applications*. 2024. 1-21. DOI: 10.1007/s11042-024-18354-1.
16. Oikonomidis A., Catal C., Kassahun A. Hybrid deep learning-based models for crop yield prediction. *Applied Artificial Intelligence*. 2022. 36. N1. 2031822. DOI: 10.1080/08839514.2022.2031823.
17. Cao J., Wang H., Li J. et al. Improving the forecasting of winter wheat yields in Northern China with machine learning—dynamical hybrid subseasonal-to-seasonal ensemble prediction. *Remote Sensing*. 2022. 14(7). 1707. DOI: 10.3390/rs14071707.
18. Cedric L.S., Adoni W.Y.H., Aworka R. et al. Crops yield prediction based on machine learning models: Case of West African countries. *Smart Agricultural Technology*. 2022. N2. 100049. DOI: 10.1016/j.atech.2022.100049.
19. Elavarasan D., Vincent D.R., Sharma V. et al. Forecasting yield by integrating agrarian factors and machine learning models: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. N155. 257-282. DOI: 10.1016/j.compag.2018.10.024.
20. Meghraoui K., Sebari I., Pilz J. et al. Applied deep learning-based crop yield prediction: a systematic analysis of current developments and potential challenges. *Technologies*. 2024. N12(4). 43. DOI: 10.3390/technologies12040043.

## REFERENCES

1. Bali N., Singla A. Emerging Trends in Machine Learning to Predict Crop Yield and Study Its Influential Factors: A Survey. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2022. 29. 95-112 (In English). DOI: 10.1007/s11831-021-09569-8.
2. Shingade S.D., Mudhalwadkar R.P. Analysis of crop prediction models using data analytics and ML techniques: a review. *Multimedia Tools and Applications*. 2024. 83. 37813-37838 (In English). DOI: 10.1007/s11042-023-17038-6.
3. Meghraoui K., Sebari I., Pilz J. et al. Applied Deep Learning-Based Crop Yield Prediction: A Systematic Analysis of Current Developments and Potential Challenges. *Technologies*. 2024. 12. N4. 43 (In English). DOI: 10.3390/technologies12040043.
4. Stepanov A.S., Aseeva T.A., Dubrovina K.N. Building and precision assessment of regression models for determining of cereals' and legumes' crop yield based on Earth remote sensing data and climatic characteristics. *InterCarto. InterGIS*. 2020. 26. N3. 159-169 (In Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2020-3-26-159-169.
5. Strashnaya A.I., Bereza O.V., Klang P.S. Forecasting grain crop yield based on the integration of ground and satellite data in the subjects of the Southern Federal District. *Hydrometeorological Research and Forecasting*. 2021. N2 (380). 111-137 (In Russian). DOI: 10.37162/2618-9631-2021-2-111-137.
6. Bischokov R.M., Akhmatov M.M. Agricultural crops analysis and yield forecast by fuzzy logic methods. *Polythematic online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2021. N168. 274-287 (In Russian). DOI: 10.21515/1990-4665-168-020.
7. Blagov D.A., Mitrofanov S.V., Nikitin V.S. et al. Mathematical models and software package for forecasting crop yields. *Agrotehnika i energoobespechenie*. 2019. N3 (24). 182-188 (In Russian). EDN: OMWNXT.
8. Arkhipova M.Yu., Smirnov A.I. Current trends in crop yield forecasting based on the use of econometric models. *Voprosy statistiki*. 2020. 27. N5. 65-75 (In Russian). DOI: 10.34023/2313-6383-2020-27-5-65-75.
9. Momenpour S.E., Bazgeer S., Moghbel M. A bibliometric

- analysis of the literature on crop yield prediction: insights from previous findings and prospects for future research. *International Journal of Biometeorology*. 2024. N68. 829-842 (In English). DOI: 10.1007/s00484-024-02628-2.
10. Makeev K.A., Grecheneva A.V., Kotov Ya.S. et al. Comparison of the effectiveness of machine learning algorithms in crop yield forecasting tasks. *Izvestiya Tula State University*. 2023. N2. 203-206 (In Russian). DOI: 10.24412/2071-6168-2023-2-203-206.
  11. Dudko Yu.V., Marinkin E.B., Vladimirova T.M. Application of neural network technologies in predicting soil fertility with leguminous crops and predicting their yields. *Voprosy Nauki: Innovatika, Tekhnika i Tekhnologii*. 2019. N1. 67-72 (In Russian). EDN: YXPXCX.
  12. Rogachev A.F. System analysis and forecasting of time series of crop production based on autocorrelation function and neural network technologies. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex*. 2018. N3 (51). 309-316 (In Russian). EDN: VOQSWI.
  13. Rogachev A.F., Melikhova E.V. Justification of algorithms and tools for neural network forecasting of agricultural productivity using retrospective data. *Proceedings of Lower Volga Agro-University Complex*. 2020. N1(57). 290-302 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2020-01-29.
  14. Bischokov R.M. Analysis, modelling and forecasting of crop yields using artificial neural networks. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2022. 17. N2. 146-157 (In Russian). DOI: 10.22363/2312-797X-2022-17-2-146-157.
  15. Boppudi S.J.S. Deep ensemble model with hybrid intelligence technique for crop yield prediction. *Multimedia Tools and Applications*. 2024. 1-21 (In English). DOI: 10.1007/s11042-024-18354-1.
  16. Oikonomidis A., Catal C., Kassahun A. Hybrid deep learning-based models for crop yield prediction. *Applied Artificial Intelligence*. 2022. 36. N1. 2031822. (In English). DOI: 10.1080/08839514.2022.2031823.
  17. Cao J., Wang H., Li J. et al. Improving the forecasting of winter wheat yields in Northern China with machine learning—dynamical hybrid subseasonal-to-seasonal ensemble prediction. *Remote Sensing*. 2022. N14(7). 1707 (In English). DOI: 10.3390/rs14071707.
  18. Cedric L.S., Adoni W.Y.H., Aworka R. et al. Crops yield prediction based on machine learning models: Case of West African countries. *Smart Agricultural Technology*. 2022. 2. 100049 (In English). DOI: 10.1016/j.atech.2022.100049.
  19. Elavarasan D., Vincent D.R., Sharma V. et al. Forecasting yield by integrating agrarian factors and machine learning models: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018. N155. 257-282 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2018.10.024.
  20. Meghraoui K., Sebari I., Pilz J. et al. Applied deep learning-based crop yield prediction: a systematic analysis of current developments and potential challenges. *Technologies*. 2024. N12(4). 43. (In English). DOI: 10.3390/technologies12040043.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Заявленный вклад соавторов:

Каличкин В.К. – научное руководство, постановка проблемы, формулирование основной концепции работы, целей и задач исследования, написание текста, формирование общих выводов, итоговая переработка статьи;  
 Максимович К.Ю. – формулирование основных целей и задач исследования, анализ литературных источников, доработка основного текста и разработка графического материала, участие в формировании общих выводов;  
 Аleshchenko O.A. – поиск и первичный анализ литературных источников, работа с базами данных, техническое редактирование;  
 Аleshchenko V.V. – методология, доработка окончательного варианта рукописи, верификация выводов.  
 Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Coauthors' contribution:

Kalichkin V.K. – scientific supervision, problem statement, formulation of the main concept, definition of research objectives and tasks, drafting of the manuscript, formulation of general conclusions, and final revision of the manuscript;  
 Maksimovich K.Yu. – definition of key research objectives and tasks, literature review, revision of the manuscript, development of graphical materials, and contribution to the formulation of general conclusions;  
 Aleshchenko O.A. – identification and preliminary analysis of literature sources, database management, and technical editing;  
 Aleshchenko V.V. – development of methodology, revision of the final manuscript version, and validation of the conclusions.  
 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

03.04.2025  
 27.05.2025

EDN: LGIDJN

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-45-52

Научная статья  
УДК 632.08; 004.896

## Обнаружение болезней земляники садовой с использованием мультиспектральной съемки с БПЛА

Анна Федоровна Чешкова,  
кандидат физико-математических наук,  
e-mail: cheshanna@yandex.ru;

Вера Сергеевна Риксен,  
кандидат сельскохозяйственных наук,  
e-mail: riclog@mail.ru

Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, р.п. Краснообск, Новосибирская обл., Российская Федерация

**Реферат.** Точная, своевременная и неинвазивная диагностика болезней имеет важное значение в промышленном производстве земляники, так как позволяет минимизировать потери урожая и снизить затраты на обработку растений. Благодаря развитию беспилотных летательных аппаратов и сенсорных технологий дистанционное зондирование становится перспективным способом мониторинга болезней сельскохозяйственных культур. Оперативное выявление заболеваний на ранних стадиях особенно важно для таких чувствительных культур, как земляника садовая. (*Цель исследования*) Анализ возможности обнаружения грибковых болезней земляники садовой в полевых условиях с применением мультиспектральных сенсоров и беспилотных летательных аппаратов. (*Материалы и методы*) В коллекционном питомнике СибФТИ СФНЦА РАН была выполнена аэрофотосъемка растений земляники, пораженных белой пятнистостью. Мультиспектральная камера была установлена на квадрокоптере *DJI Phantom4 Multispectral*. Полученные данные прошли предварительную обработку, включая построение ортофотоплана и извлечение спектральных и текстурных характеристик изображений. (*Результаты и обсуждение*) На основе анализа мультиспектральных данных выделены наборы информативных признаков для дифференциации здоровых и пораженных грибами растений. Методом случайного леса (*Random Forest*) построена модель для обнаружения болезней земляники с точностью классификации 77 процентов. (*Выводы*) Для повышения точности классификации необходимы дополнительные исследования с применением сенсоров, обладающих более высоким пространственным разрешением. Также перспективным направлением является разработка классификационных моделей на основе сверточных нейронных сетей, которые могут улучшить результаты за счет более глубокого анализа изображений. Полученные результаты подтверждают потенциал использования БПЛА и мультиспектральных технологий для мониторинга заболеваний сельскохозяйственных культур.

**Ключевые слова:** земляника садовая, грибковые болезни, диагностика, мультиспектральные изображения, беспилотный летательный аппарат, компьютерное зрение, машинное обучение

■ **Для цитирования:** Чешкова А.Ф., Риксен В.С. Обнаружение болезней земляники садовой с использованием мультиспектральной съемки с БПЛА // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №2. С. 45-52. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-45-52. EDN: LGIDJN.

Scientific article

## Strawberry Disease Detection Using Multispectral UAV Imagery

Anna F. Cheshkova,  
Ph.D.(Phys.-Math.), leading researcher,  
e-mail: cheshanna@yandex.ru;

Vera S. Riksen,  
Ph.D.(Agri.), junior researcher,  
e-mail: riclog@mail.ru

Siberian Federal Research Centre of Agro-BioTechnologies of the RAS, Krasnoobsk, Novosibirsk region, Russian Federation

**Abstract.** Accurate, timely, and non-invasive diagnosis of plant diseases is essential in the industrial cultivation of strawberries, as it helps minimize yield losses and reduce treatment costs. With the advancement of unmanned aerial vehicles and sensor technologies, remote sensing has emerged as a promising tool for monitoring crop health and detecting diseases. Early detection is especially important for sensitive crops such as garden strawberries. (*Research purpose*) The research aims to evaluate the potential of using multispectral sensors and unmanned aerial vehicles for detecting fungal diseases in garden strawberries under field conditions. (*Materials and methods*) Aerial imaging of strawberry plants affected by white leaf spot was carried out at the experimental nursery of the Siberian Federal Research Center for Agro-BioTechnologies of the RAS (SibFRC ABT RAS). A DJI

Phantom 4 Multispectral quadcopter equipped with a multispectral camera was used for data collection. The acquired imagery underwent preliminary processing, including orthophotomap generation and extraction of spectral and textural features from the images. (*Results and discussion*) Analysis of the multispectral data enabled the identification of informative feature sets for distinguishing between healthy and fungus-infected strawberry plants. A disease detection model developed using the Random Forest algorithm, achieved a classification accuracy of 77%. (*Conclusions*) To improve classification accuracy, further research involving sensors with higher spatial resolution is recommended. Another promising direction is the development of classification models based on convolutional neural networks, which offer improved performance through deeper image analysis. The results confirm the potential of UAV-based multispectral imaging for effective crop disease monitoring.

**Keywords:** garden strawberry, fungal diseases, diagnostics, multispectral imagery, unmanned aerial vehicle (UAV), computer vision, machine learning.

**For citation:** Cheshkova A.F., Riksen V.S. Strawberry disease detection using multispectral UAV imagery. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N2. 45-52 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-45-52. EDN: LGIDJN.

**Н**а долю земляники садовой приходится свыше 70% общемирового производства ягод. Это обусловлено ее высокими вкусовыми, диетическими и лечебными качествами, а с другой стороны, способностью к быстрому вегетативному размножению, скороплодностью, высокой рентабельностью и урожайностью. Один из главных сдерживающих факторов увеличения производства ягод земляники садовой состоит в значительном поражении возделываемых сортов земляники грибковыми болезнями (микозы), снижении продуктивности плантаций от 15 до 92% и их гибели (Говорова Г.Ф., Говоров Д.Н. Грибные болезни земляники садовой, селекция на иммунитет и другие методы защиты. М.: РГАУ-МСХА, 2015. 168 с.).

Диагностика болезней и их возбудителей – важное звено в системе защиты растений. В настоящее время быстрыми темпами развиваются новые неинвазивные методы диагностики болезней растений с использованием сенсорных технологий, робототехники, компьютерного зрения и машинного обучения [1-4]. Современные высокопроизводительные методы позволяют получать данные в режиме реального времени и анализировать информацию о целом спектре физиологических параметров.

Эти методы фокусируются на различиях оптических характеристик инфицированных и здоровых растений, регистрируемых различными сенсорами (RGB, мультиспектральными) на спутниках, беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) или наземных платформах [5]. Наиболее эффективным и недорогим решением для полевого мониторинга болезней растений на больших площадях является использование БПЛА, оборудованных оптическими сенсорами [6, 7].

Для анализа большого объема полученных данных, как правило, используют методы машинного обучения [8-10]. Различия спектральных характеристик здоровых и пораженных патогенами тканей листьев земляники служат основой для построения моделей классификации.

Множество исследований показывают, что использование вегетационных индексов в качестве информативных признаков позволяет добиться хороших результатов в выявлении и распознавании болезней сельскохозяйственных культур [11, 12]. Вегетационные индексы являются алгебраическими комбинациями, рассчитываемыми по спектрам отражения двух или более выбранных длин волн.

Когда для мониторинга заболеваний недостаточно спектральных показателей, важную роль в повышении точности классификации играют текстурные характеристики, описывающие пространственное распределение пикселей изображения [13, 14]. Эффективным методом извлечения текстурной информации является расчет матрицы совместной встречаемости уровней серого (*gray-level co-occurrence matrix*, *GLCM*) [15].

В научных публикациях приводятся примеры успешного применения сенсорных технологий и машинного обучения для обнаружения и диагностики заболеваний сельскохозяйственных культур. Так, в работе [11] приводится сравнение различных методов машинного обучения для обнаружения болезни цитрусового озеленения на основе анализа мультиспектральных снимков, полученных с БПЛА. В качестве исходных данных для обучения моделей используются комбинации спектральных значений, вегетационных индексов и главных компонент PCA.

Методы ансамблевого обучения и нейронной сети показали высокую надежность и лучшие результаты классификации (100% в *AdaBoost* и 97,28% в нейронной сети).

Проводятся исследования возможности обнаружения и дифференциации двух видов болезней винограда с использованием мультиспектральной камеры, установленной на БПЛА [11]. Методом анализа ROC-кривых были выбраны наиболее информативные спектральные каналы, вегетационные индексы и биофизические характеристики для дифференциации заболеваний.



Предлагается методика фенотипирования земляники с использованием мультиспектральных изображений с высоким разрешением на основе платформы БПЛА для изучения устойчивости земляники к вертициллезному увяданию [16].

В работе [17] изучали эффективность обнаружения болезней листьев в эвкалиптовом лесу с использованием мультиспектральных изображений высокого пространственного разрешения, полученных с помощью БПЛА. Результаты показали, что длины волн зеленого, красного и ближнего инфракрасного диапазона, индекс отражения азота и индекс зелени наиболее чувствительны к исследуемым болезням. Для дифференциации степени поражения листьев использовали алгоритм случайного леса (*Random Forest*), точность классификации составляла 90,1%.

В исследовании [18] выбирали модель классификации для определения различных стадий заболевания фузариозное увядание бананов по мультиспектральным данным. Точность классификации алгоритма случайного леса достигала 97%.

Нами не найдены публикации, посвященные обнаружению и диагностике современными средствами фенотипирования в полевых условиях таких грибковых болезней земляники, как белая, бурая и угловатая пятнистости, наиболее распространенных в условиях Западной Сибири.

**Цель исследования:** анализ возможности обнаружения грибковых болезней земляники садовой в полевых условиях с применением мультиспектральных сенсоров и беспилотных летательных аппаратов.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.**

**Растительный материал.** Материалом исследования были растения земляники садовой, выращиваемые в коллекционном питомнике СибФТИ СФНЦА РАН (р.п. Краснообск, Новосибирская обл.). На участке размером 57,5×12,4 м находились растения трехлетнего возраста, 45 разных сортов. Растения высажены рядами шириной 50 см, расстояние между рядами 70 см. С помощью визуального осмотра были отобраны 25 здоровых растений и 25 растений, имеющих видимые симптомы поражения белой пятнистостью (*Ramularia Tulasnei* Sacc). Отобранные растения были помечены стикерами желтого и красного цвета соответственно (рис. 1).

**Получение изображений.** Съемка осуществлялась с помощью квадрокоптера *DJI Phantom 4 Multispectral* (SZ DJI Technology Co., КНР). Установленная на дроне камера имеет шесть 1/2,9-дюймовых матриц CMOS, включая одну матрицу видимого излучения RGB и пять монохромных для формирования мультиспектральных изображений (табл. 1).

Съемка была проведена 05.07.2024 г. при ясной погоде на высоте 5,2 м. Разрешение съемки составило 0,3 см/пиксель. В результате получено 2328



Рис. 1. Листья земляники, пораженные белой пятнистостью

Fig. 1. Strawberry leaves affected by white leaf spot disease

снимков с перекрытием 75% в продольном и 60% в поперечном направлении.

**Обработка изображений.** Первым этапом обработки была сборка единого изображения (ортофотоплана) опытного участка из набора мультиспектральных снимков, полученных с помощью РМ4. Для данной цели использовалась программа *Agisoft Metashape Pro* (производитель *Agisoft LLC*, Россия) [19]. Результирующее изображение опытного участка было сформировано в формате *geoTiff* с разрешением 16 000×17 000×5 (рис. 2) размером 2,7 Гб.

Далее на полученном ортофотоплане вручную были выделены области интереса (*ROI*) размером 65×65 пикселей, содержащие помеченные стикерами больные и здоровые растения. Из каждой выделенной области был сформирован отдельный файл изображения. С целью удаления фона на изображения были наложены маски, построенные по пороговому значению индекса *NDVI*. Выделение *ROI*, удаление фона и формирование изображений выполнялось в программе *ENVI 5.2* (*ITT Visual Information Solutions*).

| Таблица 1                                             |                                                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| КРАТКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ DJI PHANTOM 4 MULTISPECTRAL    |                                                                                                                                                    |
| KEY SPECIFICATIONS OF THE DJI PHANTOM 4 MULTISPECTRAL |                                                                                                                                                    |
| Характеристика                                        | Значение                                                                                                                                           |
| Фильтры камеры, нм                                    | Синий (blue): 450 ±16<br>Зеленый (green): 560±16<br>Красный (red): 650 ±16<br>Красный край (rededge): 730±16<br>Ближний инфракрасный (NIR): 840±26 |
| Линзы                                                 | Угол обзора 62,7°<br>Фокусное расстояние 5,74 мм                                                                                                   |
| Максимальное разрешение изображения                   | 1600×1300 (4:3,25)                                                                                                                                 |
| Размер по земной поверхности                          | (H/18,9) см/пиксель<br>H – высота дрона по отношению к картографируемому участку, м                                                                |
| Спутниковые системы позиционирования                  | GPS + BeiDou + Галилео                                                                                                                             |
| Взлетная масса дрона, г                               | 1487                                                                                                                                               |
| Максимальное время полета, мин                        | Около 27                                                                                                                                           |
| Максимальная скорость, км/ч                           | 50                                                                                                                                                 |

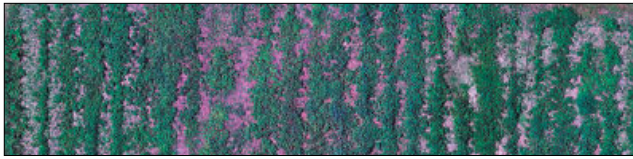


Рис. 2. Ортофотоплан экспериментального участка  
Fig. 2. Orthophoto map of the experimental plot

Наборы признаков и методы моделирования. Для анализа и классификации изображений нами был использован алгоритм случайного леса (*Random Forest*). Это нелинейная модель машинного обучения, основанная на использовании ансамбля решающих деревьев [20]. В качестве набора признаков для построения модели были рассмотрены три различных варианта:

- коэффициенты отражения в пяти диапазонах длин волн;

- 10 вегетационных индексов;
- 8 текстурных характеристик.

Все три набора признаков были сформированы из 50 файлов размера 65×65 с наложенными масками фона.

Первый набор данных включал коэффициенты отражения для каждого пикселя исходных изображений (174 800 пикс) на 5 длинах волн (синий 450 нм, зеленый 560 нм, красный 650 нм, красный край 730 нм, ближний инфракрасный 840 нм).

Второй набор данных представлял собой значения 10 вегетационных индексов, рассчитанных для каждого пикселя по формулам (табл. 2).

Третий набор данных содержал текстурные характеристики, вычисленные на основе матрицы совместной встречаемости уровней серого (*GLCM*) для каждого пикселя, для каждого мультиспектрального канала.

Было рассчитано восемь характеристик:

- среднее (*MEA*), отражающее средний уровень серого всех пикселей в матрице;
- дисперсия (*VAR*), описывающая разброс значений вокруг среднего;
- гомогенность (*HOM*), вычисляющая однородность матрицы;

- контраст (*CON*), представляющий локальную вариацию в матрице;

- несходство (*DIS*), отражающее разницу в оттенках серого;

- энтропия (*ENT*), выражающая уровень беспорядка в матрице;

- второй момент (*SEC*), который представляет однородность оттенков серого;

- корреляция (*COR*), измеряющая линейные зависимости пикселей.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Спектральные характеристики образцов. Усредненные значения коэффициентов отражения здоровых и пораженных грибными болезнями листьев земляники в различных спектральных диапазонах представлены на рисунке 3.

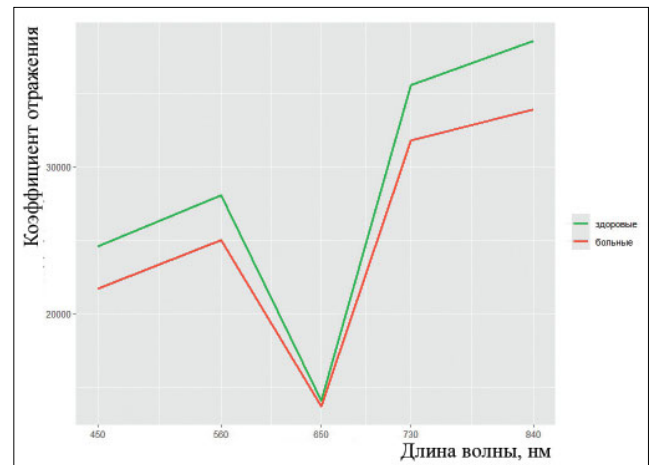


Рис. 3. Средние коэффициенты отражения здоровых и пораженных грибными болезнями листьев земляники  
Fig. 3. Average reflectance coefficients of healthy and fungus-infected strawberry leaves

Из графика видно, что во всех диапазонах длин волн здоровые растения имеют более высокие коэффициенты отражения, чем больные. Общей чертой спектральных характеристик растительной ткани является более низкий коэффициент отражения в видимом

Таблица 2

Table 2

#### ВЕГЕТАЦИОННЫЕ ИНДЕКСЫ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ В КАЧЕСТВЕ ПРИЗНАКОВ / VEGETATION INDICES USED AS CLASSIFICATION FEATURES

| Индекс                                                      | Формула для расчета                       | Биофизический индикатор |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------|
| <i>NDVI</i> (Normalized Difference Vegetation Index)        | $(NIR - Red)/(NIR + Red)$                 | Содержание антоцианинов |
| <i>GRVI</i> (Green-Red Vegetation Index)                    | $(Green - Red)/(Green + Red)$             |                         |
| <i>GNDVI</i> (Green Normalized Difference Vegetation Index) | $(NIR - Green)/(NIR + Green)$             |                         |
| <i>RGI</i> (Red Green Index)                                | $Red/Green$                               | Содержание антоцианинов |
| <i>MACI</i> (Modified Anthocyanin Content Index)            | $NIR/Green$                               |                         |
| <i>ACI</i> (Anthocyanin Content Index)                      | $Green/NIR$                               |                         |
| <i>NPCI</i> (Normalized Pigment Chlorophyll Index)          | $(Red\ Edge - Blue)/(Red\ Edge + Blue)$   | Содержание хлорофилла   |
| <i>NDRE</i> (Normalized Difference Red Edge Index)          | $(NIR - Red\ Edge)/(NIR + Red\ Edge)$     |                         |
| <i>REGI</i> (Red Edge Green Index)                          | $(Red\ Edge - Green)/(Red\ Edge + Green)$ | Обнаружение стресса     |
| <i>RERI</i> (Red Edge Rouge Index)                          | $(Red\ Edge - Red)/(Red\ Edge + Red)$     |                         |

диапазоне длин волн по сравнению с ближним инфракрасным диапазоном. На длине волны 650 нм (красный диапазон) наблюдается снижение коэффициента отражения, что связано с сильным поглощением света хлорофиллом в листьях. В диапазоне 730 нм (красный край) отражательная способность листьев резко возрастает по причине рассеивания света в межклеточном пространстве. В диапазоне 840 нм (ближний инфракрасный) коэффициент отражения остается высоким.

Критерий Стьюдента выявил значимость различий средних значений коэффициентов отражения меж-

ду больными и здоровыми растениями для каждой из длин волн с уровнем значимости  $p < 0,001$  (табл. 3).

**Расчет вегетационных индексов.** 10 вегетационных индексов были рассчитаны по соответствующим формулам. Для каждого индекса был применен критерий Стьюдента с целью выявления значимости различий между здоровыми и больными растениями по значению индекса (табл. 4).

Индексы *NDVI*, *GRVI*, *NDRE*, *REGI*, *RERI*, *RGI*, *MACI* имели уровень значимости  $p < 0,001$ . Индекс *NPCI* имел уровень значимости  $p < 0,05$ . Индексы

Таблица 3

Table 3

**РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ КРИТЕРИЯ СТЬЮДЕНТА К РАЗНИЦЕ СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ МЕЖДУ БОЛЬНЫМИ И ЗДОРОВЫМИ РАСТЕНИЯМИ**  
**STUDENT'S T-TEST RESULTS FOR DIFFERENCES IN THE MEAN REFLECTANCE VALUES BETWEEN DISEASED AND HEALTHY PLANTS**

| Диапазон длин волн | Разница средних | t-значение | p-значение |
|--------------------|-----------------|------------|------------|
| Blue               | 2871,18         | 54,82      | < 0,001    |
| Green              | 3052,23         | 45,21      | < 0,001    |
| Red                | 394,51          | 11,25      | < 0,001    |
| RedEdge            | 3738,41         | 56,21      | < 0,001    |
| NIR                | 4660,96         | 77,96      | < 0,001    |

Примечание. Число степени свободы во всех случаях составляла 174 800.

Таблица 4

Table 4

**РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ КРИТЕРИЯ СТЬЮДЕНТА К РАЗНИЦЕ СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ МЕЖДУ БОЛЬНЫМИ И ЗДОРОВЫМИ РАСТЕНИЯМИ**  
**STUDENT'S T-TEST RESULTS FOR DIFFERENCES IN MEAN VEGETATION INDEX VALUES BETWEEN DISEASED AND HEALTHY PLANTS**

| Вегетационный индекс | Разница средних | t-значение | p-значение |
|----------------------|-----------------|------------|------------|
| NDVI                 | 0,034           | 51,30      | < 0,001    |
| GRVI                 | 0,042           | 64,65      | < 0,001    |
| GNDVI                | -0,001          | -1,55      | 0,120      |
| NPCI                 | -0,002          | -2,00      | 0,046      |
| NDRE                 | 0,006           | 14,79      | < 0,001    |
| REGI                 | -0,006          | -7,75      | < 0,001    |
| RERI                 | 0,031           | 44,69      | < 0,001    |
| RGI                  | -0,056          | -60,89     | < 0,001    |
| MACI                 | -0,021          | -7,10      | < 0,001    |
| ACI                  | -0,002          | -1,89      | 0,059      |

Примечание. Число степени свободы во всех случаях составляла 175 003.

Таблица 5

Table 5

**РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ КРИТЕРИЯ СТЬЮДЕНТА К РАЗНИЦЕ СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕКСТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕЖДУ БОЛЬНЫМИ И ЗДОРОВЫМИ РАСТЕНИЯМИ**  
**STUDENT'S T-TEST RESULTS FOR DIFFERENCES IN MEAN TEXTURAL FEATURE VALUES BETWEEN DISEASED AND HEALTHY PLANTS**

| Текстурная характеристика | p-Значение критерия Стьюдента для диапазона длин волн |         |         |         |         |
|---------------------------|-------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                           | Blue                                                  | Green   | Red     | RedEdge | NIR     |
| MEA                       | < 0,001                                               | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 |
| VAR                       | < 0,001                                               | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 |
| HOM                       | 0,125                                                 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 |
| CON                       | < 0,001                                               | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 |
| DIS                       | < 0,001                                               | < 0,001 | < 0,001 | 0,544   | < 0,001 |
| ENT                       | 0,998                                                 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 |
| SEC                       | 0,949                                                 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 | < 0,001 |
| COR                       | 0,145                                                 | < 0,001 | < 0,001 | 0,016   | 0,561   |

| Таблица 6                                                                                                                  |                    |         | Table 6                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------|---------------------------------|
| МАТРИЦЫ ОШИБОК КЛАССИФИКАЦИИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ НАБОРОВ ПРИЗНАКОВ<br>CONFUSION MATRICES CORRESPONDING TO DIFFERENT FEATURE SETS |                    |         |                                 |
| Результат классификации                                                                                                    | Реальные данные, % |         | Общая точность классификации, % |
|                                                                                                                            | здоровые           | больные |                                 |
| Спектр отражения                                                                                                           |                    |         | 66,78                           |
| Здоровые объекты                                                                                                           | 65                 | 32      | –                               |
| Больные объекты                                                                                                            | 35                 | 68      | –                               |
| Вегетационные индексы                                                                                                      |                    |         | 60,98                           |
| Здоровые объекты                                                                                                           | 64                 | 42      | –                               |
| Больные объекты                                                                                                            | 36                 | 58      | –                               |
| Текстурные характеристики                                                                                                  |                    |         | 76,86                           |
| Здоровые объекты                                                                                                           | 76                 | 22      | –                               |
| Больные объекты                                                                                                            | 24                 | 78      | –                               |

*GNDVI*, *ACI* имели незначимые различия средних значений.

**Расчет текстурных характеристик.** Для каждого из пяти спектральных каналов были рассчитаны 8 текстурных характеристик на основе матрицы совместной встречаемости уровней серого *GLCM*. Относительное расстояние, измеренное в пикселях в *GLCM* ( $d = 1$ ), а относительная ориентация ( $\theta$ ) была средним значением четырех направлений ( $\theta = 0, 45, 90$  и  $135^\circ$ ).

С помощью критерия Стьюдента был определен набор характеристик для дальнейшего построения модели машинного обучения (табл. 5).

Из первоначального набора 40 характеристик 9 были исключены: корреляции (*COR*) для всех длин волн; гомогенность (*HOM*), энтропия (*ENT*), второй момент (*SEC*) для первого (*Green*) диапазона; несходство (*DIS*) для пятого (*NIR*) диапазона.

**Построение моделей машинного обучения.** Для анализа и классификации изображений нами была

использована модель машинного обучения *Random Forest*. В качестве признаков для построения модели были использованы три различных набора данных: коэффициенты отражения на 5 спектральных каналах; 10 вегетационных индексов; 31 текстурная характеристика. Исходные данные были разделены на обучающую и тестовую выборки в пропорциях 80 и 20% соответственно.

В качестве метрики оценки качества моделей использовалась общая точность классификации (*overall accuracy*), вычисляемая как процент отношения правильно классифицированных объектов к общему числу объектов. Результаты классификации приведены в таблице 6.

**Классификация и картографирование изображений.** Обученная на основе текстурных характеристик модель была применена для построения карты распространения грибных болезней земляники на экспериментальном поле. На рисунках 4, 5 представлены примеры классификации изображений в различных масштабах.

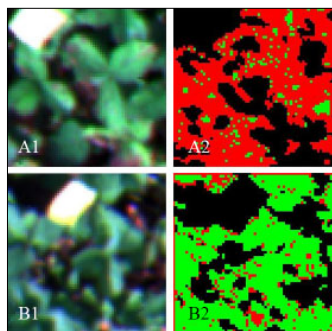


Рис. 4. Классификация изображений  $65 \times 65$  пикселей методом *Random Forest* на основе текстурных характеристик: A1, A2 – растения, пораженные белой пятнистостью и их классификация; B1, B2 – здоровые растения и их классификация

Fig. 4. Classification of  $65 \times 65$  pixel images using the *Random Forest* method based on texture features: A1, A2 – plants affected by white leaf spot disease and their classification results; B1, B2 – healthy plants and their classification results

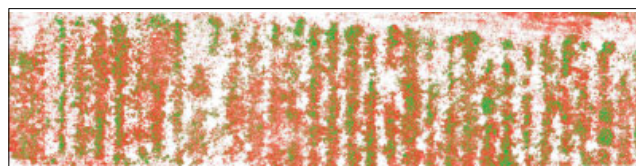


Рис. 5. Классификация ортофотоплана методом *Random Forest* на основе текстурных характеристик

Fig. 5. Classification of the orthophotomap using the *Random Forest* method based on texture features

**Выводы.** На основе экспериментальных данных проведен анализ возможности обнаружения грибных болезней земляники садовой в полевых условиях с применением мультиспектральных сенсоров и беспилотных летательных аппаратов. Для дифференциации здоровых и пораженных белой пятнистостью растений был использован алгоритм машинного обучения *Random Forest*.

Полученные результаты позволяют сделать выводы, что модели, построенные на спектре отражения или на наборе вегетационных индексов, имеют слишком низкую точность классификации, не достаточную для обнаружения заболеваний земляники. Использование текстурных характеристик позволяет повысить точность модели до 77%, что, однако, также является низким показателем. Возможная причина недостаточной точности следующая.

Видимыми симптомами грибных болезней земляники являются цветные пятна на листьях растений. Размер пятен слишком мелкий, чтобы повлиять на средний спектр всего растения. Большая часть листа остается зеленого цвета. Тем не менее, при наличии пятен все растение считается заболевшим, и все пиксели данного растения классифици-

руются, как больные, в обучающей выборке. Этим объясняется и низкая точность моделей, построенных только на спектре или вегетационных индексах, и более высокая точность модели, учитывающей текстуру листьев, т.е. пространственное распределение цвета.

Предлагаемые пути улучшения точности моделей:

- использование сенсора с высоким разрешением при съемке, позволяющего классифицировать попиксельно больные и здоровые области листьев земляники;
- построение модели с использованием сверточной нейронной сети, учитывающей наряду со спектральными характеристиками, такие текстурные характеристики, как форма и взаимное расположение пятен на листьях.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Weiss M., Jacob F., Duveiller G. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sensing of Environment*. 2020. Vol. 236. N111402. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111402.
2. Singh A., Jones S., Ganapathysubramanian B. et al. Challenges and opportunities in machine-augmented plant stress phenotyping. *Trends in Plant Science*. 2021. Vol. 26. N1. 53-69. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111402.
3. Oerke E.-C. Remote Sensing of Diseases. *Annu. Rev. Phytopathol.* 2020. Vol. 58. 225–252. DOI: 10.1146/annurev-phyto-010820-012832.
4. Bock C.H., Barbedo J.G.A., Del Ponte E.M. et al. From visual estimates to fully automated sensor-based measurements of plant disease severity: status and challenges for improving accuracy. *Phytopathology Research*. 2020. Vol. 2. N9. DOI: 10.1186/s42483-020-00049-8.
5. Чешкова А.Ф. Обзор современных методов обнаружения и идентификации болезней растений на основе анализа гиперспектральных изображений // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2022. Т. 26. N2. С. 202-213. DOI: 10.18699/VJGB-22-25.
6. Yang G., Liu J., Zhao C. et al. Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: current status and perspectives. *Front. Plant Sci.* 2017. Vol. 8. N1111. DOI: 10.3389/fpls.2017.01111.
7. Курбанов Р.К., Ценч Ю.С., Захарова Н.И. Основные тенденции в развитии технологии аэрофотосъемки сельскохозяйственных угодий // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. N1. С. 86-96. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-86-95.
8. Кутырёв А.И., Хорт Д.О., Филиппов Р.А., Ценч Ю.С. Магнитно-импульсная обработка семян земляники садовой // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N5. С. 9-15. DOI: 10.22314/2073-7599-2017-5-9-15.
9. Nagaraju M., Chawla P. Systematic review of deep learning techniques in plant disease detection. *Int J Syst Assur Eng Manag.* 2020. Vol. 11. N3. 547–560. DOI: 10.1007/s13198-020-00972-1.
10. Benos L., Tagarakis A., Dolias G. et al. Machine learning in agriculture: a comprehensive updated review. *Sensors*. 2021. Vol. 21. N3758. DOI: 10.3390/s21113758.
11. Lan Y., Huang Z., Deng X. Comparison of machine learning methods for citrus greening detection on UAV multispectral images. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 171. N105234. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105234.
12. Albetis J., Jacquin A., Goulard M. et al. On the potentiality of UAV multispectral imagery to detect *Flaves cencedorée* and grapevine trunk diseases. *Remote Sens.* 2019. Vol. 11. N23. DOI: 10.3390/rs11010023.
13. Ценч Ю.С., Курбанов Р.К., Захарова Н.И. Развитие систем управления полетом и средств аэрофотосъемки беспилотных воздушных судов сельскохозяйственного назначения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024. Т. 18. N2. С. 11-19. DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19.
14. Li S., Yuan F., Ata-UI-Karim S.T. et al. Combining color indices and textures of UAV-based digital imagery for rice LAI estimation. *Remote Sens.* 2019. Vol. 11. N1763. DOI: 10.3390/rs11151763.
15. Guo A., Huang W., Dong Y. et al. Wheat yellow rust detection using UAV-based hyperspectral technology. *Remote Sens.* 2021. Vol. 13. N123. DOI: 10.3390/rs13010123.
16. Cockerton H.M., Li B., Vickerstaff R.J. et al. Identifying *Verticillium dahlia* resistance in strawberry through disease screening of multiple populations and image based phenotyping. *Front. Plant Sci.* 2019. Vol. 10. N924. DOI: 10.3389/fpls.2019.00924.
17. Liao K., Yang F., Dang H. et al. Detection of eucalyptus leaf disease with UAV multispectral imagery. *Forests*. 2022. Vol. 13. N1322. DOI: 10.3390/f13081322.
18. Zhang S., Li X., Ba Y. et al. Banana Fusarium wilt disease detection by supervised and unsupervised methods from UAV-based multispectral imagery. *Remote Sens.* 2022. Vol. 14. N1231. DOI: 10.3390/rs14051231.
19. Sakamoto T., Ogawa D., Hiura S., Iwasaki N. Alternative procedure to improve the positioning accuracy of orthomosaic images acquired with agisoftmetashape and DJI p4 Multispectral for crop growth observation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2022. Vol. 88. N5. 323–332. DOI: 10.14358/PERS.21-00064R2.
20. Belgiu M., Dragut L. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS J. Photogram.* 2016. Vol. 114. N24–31. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011.

## REFERENCES

- Weiss M., Jacob F., Duveiller G. Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sensing of Environment*. 2020. Vol. 236. N111402 (In English). DOI: 10.1016/j.rse.2019.111402.
- Singh A., Jones S., Ganapathysubramanian B. et al. Challenges and opportunities in machine-augmented plant stress phenotyping. *Trends in Plant Science*. 2021. Vol. 26. N1. 53-69 (In English). DOI: 10.1016/j.rse.2019.111402.
- Oerke E.-C. Remote sensing of diseases. *Annu. Rev. Phytopathol.* 2020. Vol. 58. N225–252 (In English). DOI: 10.1146/annurev-phyto-010820-012832.
- Bock C.H., Barbedo J.G.A., Del Ponte E.M. et al. From visual estimates to fully automated sensor-based measurements of plant disease severity: status and challenges for improving accuracy. *Phytopathology Research*. 2020. Vol. 2. N9 (In English). DOI: 10.1186/s42483-020-00049-8.
- Cheshkova A.F. A review of hyperspectral image analysis techniques for plant disease detection and identification. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2022. Vol. 26. N2. 202-213 (In English). DOI: 10.18699/VJGB-22-25.
- Yang G., Liu J., Zhao C. et al. Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: current status and perspectives. *Front. Plant Sci.* 2017. Vol. 8. N1111 (In English). DOI: 10.3389/fpls.2017.01111.
- Kurbanov R.K., Tsench Yu.S., Zakhharova N.I. Major Trends in the Development of Aerial Photography Technology for Agricultural Lands. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N1. 86-96 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-1-86-95.
- Kutyrev A.I., Khort D.O., Filippov R.A., Tsench Yu.S. Magnetic-pulse treatment of garden strawberry seeds. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017. N5. 9-15. (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2017-5-9-15.
- Nagaraju M., Chawla P. Systematic review of deep learning techniques in plant disease detection. *Int J Syst Assur Eng. Manag.* 2020. Vol. 11. N3. 547-560 (In English). DOI: 10.1007/s13198-020-00972-1.
- Benos L., Tagarakis A., Dolias G. et al. Machine learning in agriculture: a comprehensive updated review. *Sensors*. 2021. Vol. 21. N3758 (In English). DOI: 10.3390/s21113758.
- Lan Y., Huang Z., Deng X. et al. Comparison of machine learning methods for citrus greening detection on UAV multispectral images. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 171. N105234 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2020.105234.
- Albetis J., Jacquín A., Goulard M. et al. On the potentiality of uav multispectral imagery to detect *Flaves cencedorée* and grapevine trunk diseases. *Remote Sens.* 2019. Vol. 11. N23 (In English). DOI: 0.3390/rs11010023.
- Tsench Yu.S., Kurbanov R.K., Zakhharova N.I. Evolution of flight control systems and aerial photography in unmanned agricultural aircraft. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2024. Vol. 18. N2. 11-19. (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19.
- Li S., Yuan F., Ata-UI-Karim S.T. et al. Combining color indices and textures of UAV-based digital imagery for rice LAI estimation. *Remote Sens.* 2019. Vol. 11. N1763 (In English). DOI: 10.3390/rs11151763.
- Guo A., Huang W., Dong Y. et al. Wheat yellow rust detection using UAV-based hyperspectral technology. *Remote Sens.* 2021. Vol. 13. N123 (In English). DOI: 10.3390/rs13010123.
- Cockerton H.M., Li B., Vickerstaff R.J. et al. Identifying *Verticillium dahlia* resistance in strawberry through disease screening of multiple populations and image based phenotyping. *Front. Plant Sci.* 2019. Vol. 10. N924 (In English). DOI: 10.3389/fpls.2019.00924.
- Liao K., Yang F., Dang H. et al. Detection of eucalyptus leaf disease with UAV multispectral imagery. *Forests* 2022. Vol. 13. N1322 (In English). DOI: 10.3390/f13081322.
- Zhang S., Li X., Ba Y. et al. Banana *Fusarium* wilt disease detection by supervised and unsupervised methods from UAV-based multispectral imagery. *Remote Sens.* 2022. Vol. 14. N1231 (In English). DOI: 10.3390/rs14051231.
- Sakamoto T., Ogawa D., Hiura S., Iwasaki N. Alternative procedure to improve the positioning accuracy of orthomosaic images acquired with Agisoft Metashape and DJI P4 Multispectral for crop growth observation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2022. Vol. 88. N5. 323-332 (In English). DOI: 10.14358/PERS.21-00064R2.
- Belgiu M., Dragut L. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2016. Vol. 114. N24–31 (In English). DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Заявленный вклад соавторов:

Чешкова А.Ф. – постановка проблемы, анализ литературных источников, обработка и анализ экспериментальных данных, выбор и обучение модели, формирование выводов, работа с текстом статьи;

Риксен В.С. – научное консультирование, проведение эксперимента.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

## Coauthors' contribution:

Cheshkova A.F. – problem statement, literature review, experimental data processing and analysis, model selection and training, drawing conclusions, and drafting the article manuscript;

Riksen V.S. – scientific consultation and experimental work.

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

03.04.2025

20.05.2025

EDN: CQSIWN

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-53-63

Научная статья  
УДК 669.781: 539.538

## Противоизносные характеристики железоуглеродистых твердосплавных покрытий рабочих органов почвообрабатывающих машин

Яков Петрович Лобачевский<sup>1</sup>,  
доктор технических наук, профессор,  
академик РАН,  
e-mail: lobachevsky@yandex.ru;

Денис Александрович Миронов<sup>2</sup>,  
кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
e-mail: mironov-denis87@mail.ru

<sup>1</sup>Российская академия наук, Москва, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Разработка новых износостойких твердосплавных композиций для наплавочного упрочнения изделий, эксплуатируемых в жестко абразивных средах, в частности почве, является одним из эффективных направлений борьбы с абразивным износом и его последствиями. Серийно выпускаемые железоуглеродистые твердые сплавы имеют невысокие характеристики сопротивления абразивному изнашиванию. (*Цель исследования*) Разработка новых твердых сплавов на основе высоколегированных чугунов, обеспечивающих повышение износостойкости и эффективности применения упрочняющих наплавочных покрытий на быстроизнашиваемые детали почвообрабатывающей техники. (*Материалы и методы*) Априорный анализ показал, что увеличенное содержание бора повышает, как правило, сопротивляемость сталей и твердых сплавов абразивному изнашиванию. Отмечена сложность и недостаточная изученность влияния легирования бором, в частности железоуглеродистых твердых сплавов. По результатам предшествующих исследований приведены рекомендуемые граничные пределы содержания бора в сплавах – 0,5-6,0 процента. Отмечены особенности влияния легирования бором в сочетании с содержанием в сплавах марганца и никеля. Методы исследований состояли в проведении и оценке результатов сравнительных лабораторных и эксплуатационно-полевых ресурсных испытаний образцов и полнокомплектных изделий с нанесенными различными видами твердосплавных покрытий. (*Результаты и обсуждение*) Исследованы четыре новых вида борсодержащих твердых сплавов. Проведены их сравнительные лабораторные и эксплуатационные испытания. Лучший из разработанных твердых сплавов, с условным обозначением ПР-ФБ3Х, имеет при наплавочном нанесении до 1,6 раз более высокий коэффициент относительной износостойкости в сравнении с лучшим из серийных сплавов ПГ-ФБХ-6-2. Разработанные сплавы в ряде случаев могут быть экономически эффективными заменителями композиций серийных твердых сплавов с добавками дорогостоящего литого карбида вольфрама. (*Выводы*) В результате проведенных исследований и практических работ созданы новые сплавы ПР-ФБ3Х и ПР-ФБ2,5Х, отличающиеся, прежде всего повышенным (до 3,2 процента) содержанием бора, имеющие высокую противоизносную характеристику. Данные сплавы возможно использовать как качественные, экономически эффективные заменители серийных железоуглеродистых сплавов с добавками литого карбида вольфрама (WC).

**Ключевые слова:** упрочнение, износостойкость, износ, испытания, твердые сплавы, легирующие элементы, бор.

■ **Для цитирования:** Лобачевский Я.П., Миронов Д.А. Противоизносные характеристики железоуглеродистых твердосплавных покрытий рабочих органов почвообрабатывающих машин // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. N2. С. 53-63. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-53-63. EDN: CQSIWN.

Scientific article

## Anti-wear Properties of Iron-Carbon Hard Alloy Coatings for Working Bodies of Tillage Machinery

Yakov P. Lobachevsky<sup>1</sup>,  
Dr.Sc.(Eng.), professor, member of the Russian Academy  
of Sciences,  
e-mail: lobachevsky@yandex.ru;

Denis A. Mironov<sup>2</sup>,  
Ph.D.(Eng.), leading researcher,  
e-mail: mironov-denis87@mail.ru

<sup>1</sup>Russian Academy of Sciences (RAS), Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup>Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The development of new wear-resistant hard-alloy compositions for hardfacing the working surfaces of components operating in highly abrasive environments, particularly soil, is one of the most effective strategies for mitigating abrasive wear and its effects. Industrially produced iron–carbon-based hard alloys have relatively low abrasive wear resistance. (*Research purpose*) To develop new hard alloys based on high-alloy cast irons that increase wear resistance and improve the efficiency of hardfacing coatings applied to wear-prone components of tillage machinery. (*Materials and methods*) A priori analysis indicates that increasing boron content generally enhances the abrasion resistance of steels and hard alloys. However, the specific effects of boron alloying, particularly in iron–carbon-based hard alloys, remain complex and insufficiently studied. Based on previous research, the recommended boron content in such alloys ranges from 0.5 to 6.0 percent. This study also explores the combined effect of boron alloying with manganese and nickel. The research methodology included comparative laboratory and operational field life testing of specimens and full-scale components coated with various types of hard-alloy overlays. (*Results and discussion*) Four newly developed boron-containing hard alloys were evaluated through comparative laboratory and field tests. Among them, the alloy designated PR-FB3Kh showed the highest performance, demonstrating up to 1.6 times higher relative wear resistance when applied by hardfacing, compared to the leading industrially produced alloy PG-FBK6-2. In certain applications, these new alloys may serve as cost-effective alternatives to industrially produced hard-alloy compositions containing expensive cast tungsten carbide additives. (*Conclusions*) As a result of the research and testing, two new alloys PR-FB3Kh and PR-FB2.5Kh were developed. These alloys are distinguished primarily by their elevated boron content (up to 3.2 percent) and high wear resistance. They present a high-quality, cost-effective alternative to conventional iron-carbon-based alloys that incorporate cast tungsten carbide (WC).

**Keywords:** reinforcement, wear resistance, abrasion, testing, hard alloys, alloying elements, boron.

■ **For citation:** Lobachevsky Ya.P., Mironov D.A. Anti-wear properties of iron-carbon hard alloy coatings for working bodies of tillage machinery. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N2. 53-63 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-53-63. EDN: CQSIWN.

Обеспечение высокой износостойкости компонентов машин – обязательное условие надежной и продолжительной работы машинных систем и достижения максимальной экономической выгоды от их использования, так как именно из-за износа теряется функциональность большинства (до 80%) подвижных элементов и рабочих органов машин и агрегатов [1, 2].

Самым распространенным и агрессивным видом изнашивания является абразивное. Наиболее ярко негативные последствия абразивного изнашивания проявляются при эксплуатации технических средств в почвенной среде. Проблема повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин является острой во всем мире, в существенной степени определяющей уровень технической оснащенности обеспечения технологических операций при культивировании тех или иных сельскохозяйственных культур [3]. В нашей стране это направление исследований и разработок имеет повышенную актуальность в виду многообразия типов (в том числе по изнашивающей способности) обрабатываемых почв.

Применение твердосплавных покрытий – один из эффективных путей повышения износостойкости и ресурса быстроизнашиваемых почворезущих деталей. Разработанные в 1960-1970-х годах сплавы на основе высоколегированных чугунов («сормайт», ПГ-С27, ПГ-УС25, ПГ-ФБХ-6-2 и др.), покрытия из которых наносятся на быстроизнашиваемые почворезущие рабочие органы, не отличаются вы-

сокой износостойкостью. Коэффициент относительной износостойкости этих сплавов в сравнении с термообработанными отечественными сталями 45, Л53, 65Г, М76, 30ХГСА и другими, обычно используемыми в качестве материала основы в отечественном серийном производстве деталей для почвообрабатывающих машин, находится в пределах 2,7-3,3. Такие параметры износостойкости не позволяют значительно (как правило, не более чем в 1,4-1,9 раза) повысить ресурс изнашиваемых почвообрабатывающих рабочих органов, вследствие чего использование устаревших упрочняющих сплавов в наплавочных технологиях имеет ограниченную экономическую эффективность [4, 5].

**Цель исследования.** Разработка новых твердых сплавов на основе высоколегированных чугунов, обеспечивающих повышение износостойкости и эффективности применения упрочняющих покрытий на быстроизнашиваемых деталях почвообрабатывающей техники.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Анализ литературных источников и результатов теоретических и эксплуатационно-ресурсных исследований почворезущих рабочих органов с различными нанесенными покрытиями показал, что одним из эффективных путей увеличения износостойкости является повышенное содержания в сплавах бора [6].

Бор – достаточно популярный и эффективный легирующий элемент, влияние которого на свойства сплавов изучено пока недостаточно. Отмечается сложность влияния бора на структуру и харак-

теристики наплавленного слоя. В исследовательских работах встречаются рекомендации о количестве бора в наплавленных твердосплавных материалах в пределах от 0,5 до 6%. Также известно, что лучшие характеристики при увеличении содержания бора имеют сплавы с достаточно высоким содержанием углерода (более 2-3%). В этом случае в структуре сплава появляется избыточное количество высокоизносостойких мартенситных игл. В общем плане установлено, что введение бора в твердосплавные материалы повышает их твердость и износостойкость [7, 8].

Практический опыт эксплуатации упрочненных твердыми сплавами на основе высоколегированных чугунов почворежущих деталей также показал некоторые значимые особенности, характерные для сплавов в зависимости от уровня легирования никелем и марганцем. Например, можно отметить, что практически все отечественные серийные высокоуглеродистые твердые сплавы на основе высоколегированных чугунов (ПГ-С1, ПГС-27, ПГ-УС25, ПР-Х30СРНДЮ и др.), в достаточно высокой степени применяемых при упрочнении рабочих органов почвообрабатывающих машин, имеют в своем составе 1,2-4,2% никеля в качестве легирующей добавки. Как исключение, можно определить сплав ПГ (либо ПР)-ФБХ-6-2. Этот сплав не содержит никель (или почти не содержит), но имеет место повышенное (более 3%) содержание марганца. На основе результатов износно-ресурсных испытаний и исследований, проведенных за последние 30-35 лет, можно утверждать, что именно этот сплав устойчиво обеспечивает повышенные характеристики износостойкости наплавленных деталей [9, 10].

В сравнении с другими сплавами, содержащими никель, относительная износостойкость сплава

ПГ-ФБХ-6-2 усредненно в различных почвенных условиях выше на 12-28%. Упрочнение почворежущих деталей твердыми сплавами на никелевой основе (самофлюсующимися, содержащими более 70% никеля), даже несмотря на высокое содержание бора (до 4,3%), менее эффективно по износостойкости (на 8-17%), особенно в условиях эксплуатации в жесткоабразивной почвенной среде даже в сравнении с обычными (типа «сормайт») железоуглеродистыми сплавами, а в сравнении со сплавом ПГ-ФБХ-6-2 это различие может достигать 20-32%. При этом следует отметить, что в самофлюсующихся сплавах относительно низкое содержание основного карбидообразующего элемента углерода (не более 1,3%). Как показано ранее, ряд исследователей установили большую эффективность добавок бора при значительном содержании в сплавах углерода [11].

Таким образом, на основании аналитических, теоретических и эксплуатационных исследований можно определить, что для обеспечения повышенных характеристик износостойкости в условиях повышенного жесткоабразивного изнашивания необходимо создание новых твердых сплавов с увеличенным содержанием бора, при относительно высоких концентрациях углерода и марганца, в некоторых вариантах – без содержания никеля [12, 13]. Подобное соотношение легирующих элементов, вероятно, повысит прочность матрицы и твердость карбидных составляющих с уменьшением размеров зерна.

Методы исследований заключались в проведении и оценке результатов сравнительных лабораторных и эксплуатационно-полевых ресурсных испытаний образцов деталей и полнокомплектных рабочих органов с нанесенными различными типами твердосплавными покрытиями.

Таблица 1

Table 1

**Исходный химический состав исследуемых наносимых твердосплавных порошков  
и монометаллических стальных образцов и изделий**

**INITIAL CHEMICAL COMPOSITION OF THE DEPOSITED CARBIDE POWDERS AND MONOMETALLIC STEEL SAMPLES AND PRODUCTS UNDER INVESTIGATION**

| №<br>п/п | Твердый сплав или сталь      | Химический состав, % |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |    |
|----------|------------------------------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|----|
|          |                              | Основа               | C    | Cr   | Si   | Mn   | Ni   | Cu   | B    | Al   | S     | P     | WC |
| 1        | ПГ-ФБХ-6-2 (серийный)        | Fe                   | 4,5  | 34,6 | 2,0  | 3,2  | –    | –    | 2,1  | 0,4  | 0,03  | 0,03  | –  |
| 2        | ПР-Х30СР30РДЮ                | Fe                   | 4,92 | 30,7 | 3,15 | 0,93 | 1,42 | –    | 2,01 | 0,5  | 0,03  | 0,03  | –  |
| 3        | ПГ-ФБ2,5Х                    | Fe                   | 4,65 | 33,7 | 1,78 | 4,53 | –    | –    | 2,55 | 2,0  | 0,11  | 0,03  | –  |
| 4        | ПГ-ФБ3Х                      | Fe                   | 4,49 | 32,0 | 2,4  | 3,5  | –    | –    | 3,2  | –    | 0,011 | 0,03  | –  |
| 5        | ПР-Х30СР2,5НДЮ               | Fe                   | 4,28 | 31,0 | 3,9  | 1,1  | 1,68 | 0,7  | 2,75 | 2,0  | 0,001 | 0,03  | –  |
| 6        | ПР-Х30СР3НДЮ                 | Fe                   | 4,45 | 30,4 | 3,9  | 1,08 | 1,56 | 0,7  | 3,2  | 2,0  | 0,001 | 0,03  | –  |
| 7        | ПГ-ФБ3Х(70%)+WC(30)          | Fe                   | –    | –    | –    | –    | –    | –    | –    | –    | –     | 2     | 30 |
| 8        | ПР-Х30СР3НДЮ (70%) + WC(30%) | Fe                   | –    | –    | –    | –    | –    | –    | –    | –    | –     | 2     | 30 |
| 9        | ПГ-ФБХ-6-2(70%)+ WC(30%)     | Fe                   | –    | –    | –    | –    | –    | –    | –    | –    | –     | 2     | 30 |
| 10       | Сталь 45                     | Fe                   | 0,46 | 0,20 | 0,27 | 0,70 | 0,15 | 0,10 | –    | 0,05 | 0,040 | 0,035 | –  |
| 11       | Сталь 30ХГСА                 | Fe                   | 0,31 | 1,0  | 1,1  | 0,45 | 0,2  | 0,2  | –    | 0,03 | 0,025 | 0,025 | –  |

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** В соответствии с приведенными научно-практическими обоснованиями создания новых твердых сплавов были исследованы четыре новых твердых сплава с увеличенным содержанием бора: два – на основе серийного безникелевого твердого сплава ПР-ФБХ-6-2 и два – на основе сплава с содержанием никеля (до 2%) ПР-Х30СРНДЮ также с увеличенным содержанием бора. Кроме того, в развитие и для уточнения приведенных в работе научных данных было исследовано три сплава (серийный и два опытных) с механической добавкой 30% порошка литого карбида вольфрама (WC) [14, 15].

В качестве материала-эталоны использовались серийные отечественные стали 45 и 30ХГСА, часто являющиеся материалом основы отечественных и импортных рабочих органов почвообрабатывающих машин. Химический состав исследуемых наносимых твердосплавных порошков и моносталей [8] представлен в *таблице 1*.

Все сплавы (серийные и опытные) выплавлены методом распыла в АО «Полема» (г. Тула). Грануляция твердосплавных порошков 140-630 мкм. Изготовление механических смесей сплавов с карбидом вольфрама (WC) произведено на специальном оборудовании в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. Исследования структуры и другие металлографические исследования проводились в НИТУ МИСиС. Нанесение твердосплавных покрытий на образцы и опытные почворезущие рабочие органы выполнялись методом плазменной дуговой наплавки [16, 17] в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

На первом этапе были проведены лабораторные сравнительные испытания на износостойкость на двух различных лабораторных стендах (*рис. 1*) [18].

Обобщенные сравнительные результаты лабораторных исследований приведены в *таблицах 2, 3*.



*Рис. 1. Исследование процесса изнашивания образца: сверху на стенде ИМ-01; внизу на круговом стенде*  
*Fig. 1. Examination of the sample wear process at the IM-01 test stand (top) and at the circular test stand (bottom)*

Условия лабораторных исследований: абразив – песок крупный (67%) + глина (33%); скорость движения образцов – 2 м/с; глубина хода образцов – 14-15 см; цикл исследований – 100 ч; размеры образцов: 6×30×60 мм; толщина твердосплавного покрытия – 3 мм; повторность – трехкратная.

При анализе результатов сравнительных лабораторных исследований на абразивную износостойкость учитывалось следующее.

При работе на машине трения ИМ-01 изнашиванию подвергается только наружная поверхность твердого сплава (твердосплавного покрытия), а при исследованиях на круговом почвенном стенде – преимущественно торцевая поверхность твердосплавного покрытия. Этот факт является одной из вероятных причин относительно невысокой срав-

Таблица 2

Table 2

| РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА СТЕНДЕ ИМ-01 ПОКРЫТИЙ ИЗ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И СТАЛЕЙ<br>ПРИ УДЕЛЬНЫХ НАГРУЗКАХ НА РОЛИК 200 Г И 500 Г |                                           |                    |                                                        |                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------|--------------------|
| RESULTS OF LABORATORY TESTS AT THE IM-01 STAND FOR CARBIDE AND STEEL COATINGS UNDER SPECIFIC LOADS OF 200 G AND 500 G PER ROLLER                     |                                           |                    |                                                        |                    |
| №<br>п/п                                                                                                                                             | Марка материала (сталь,<br>твердый сплав) | Твердость, ед. HRC | Коэффициент относительной износостойкости ( $K_{но}$ ) |                    |
|                                                                                                                                                      |                                           |                    | при нагрузке 200 г                                     | при нагрузке 500 г |
| 1                                                                                                                                                    | ПГ-ФБХ-6-2 (серийный)                     | 58-59              | 3,47                                                   | 3,09               |
| 2                                                                                                                                                    | ПР-Х30СРНДЮ (серийный)                    | 56-58              | 2,95                                                   | 2,58               |
| 3                                                                                                                                                    | ПГ-ФБ2,5Х                                 | 61-63              | 3,84                                                   | 3,68               |
| 4                                                                                                                                                    | ПГ-ФБ3Х                                   | 65-69              | 4,29                                                   | 4,11               |
| 5                                                                                                                                                    | ПР-Х30СР2,5НДЮ                            | 61-63              | 3,53                                                   | 3,44               |
| 6                                                                                                                                                    | ПР-Х30СР3НДЮ                              | 60-62              | 3,59                                                   | 3,41               |
| 7                                                                                                                                                    | ПГ-ФБ3Х(70%)+WC(30%)                      | 63-67              | 4,88                                                   | 4,76               |
| 8                                                                                                                                                    | ПР-Х30СР3НДЮ(70%)+WC(30%)                 | 62-67              | 3,88                                                   | 4,08               |
| 9                                                                                                                                                    | ПГ-ФБХ-6-2(70%)+WC(30%)                   | 61-64              | 3,94                                                   | 3,82               |
| 10                                                                                                                                                   | Сталь 45                                  | 38-41              | 1,00                                                   | 1,00               |
| 11                                                                                                                                                   | Сталь 30ХГСА                              | 46-50              | 1,08                                                   | 1,06               |

Таблица 3

Table 3

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБРАЗЦОВ С ТВЕРДОСПЛАВНЫМИ (ОПЫТНЫМИ И СЕРИЙНЫМИ) ПОКРЫТИЯМИ И ОБРАЗЦОВ ИЗ МОНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ НА КРУГОВОМ ПОЧВЕННОМ СТЕНДЕ**  
**RESULTS OF LABORATORY TESTS ON SAMPLES WITH CARBIDE COATINGS (EXPERIMENTAL AND SERIAL) AND MONOMETALLIC STEEL SAMPLES AT THE CIRCULAR SOIL TEST STAND**

| № п/п | Марка материала (сталь, твердосплавное покрытие) | Твердость, ед. HRC | Среднее значение линейного износа образца, мм           |                        | Коэффициент относительной износостойкости |                                                    |
|-------|--------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|
|       |                                                  |                    | с твердосплавным покрытием или монометаллической сталью | без покрытия (эталоны) | образца, $K_{лин}$                        | покрытия (твердого сплава) расчетный, $K_{по}$ ( ) |
| 1     | ПГ-ФБХ-6-2 (серийный)                            | 58-62              | 4,5                                                     | 11,0                   | 2,44                                      | 3,45                                               |
| 2     | ПР-Х30СРНДЮ (серийный)                           | 56-58              | 5,4                                                     | 11,0                   | 2,03                                      | 2,87                                               |
| 3     | ПГ-ФБ2,5Х                                        | 61-63              | 3,8                                                     | 10,9                   | 2,87                                      | 4,06                                               |
| 4     | ПГ-ФБ3Х                                          | 64-69              | 3,5                                                     | 11,1                   | 3,17                                      | 4,48                                               |
| 5     | ПР-30СР2,5НДЮ                                    | 61-63              | 4,1                                                     | 11,2                   | 2,73                                      | 3,86                                               |
| 6     | ПР-Х30СР3НДЮ                                     | 60-62              | 4,0                                                     | 11,0                   | 2,75                                      | 3,89                                               |
| 7     | ПГ-ФБ3Х(70%) +WC(30%)                            | 63-67              | 3,0                                                     | 11,2                   | 3,73                                      | 5,28                                               |
| 8     | ПР-Х30СР3НДЮ (70%)+WC(30%)                       | 62-67              | 3,2                                                     | 10,8                   | 3,48                                      | 4,92                                               |
| 9     | ПГ-ФБХ-6-2(70%)+WC(30%)                          | 61-64              | 3,3                                                     | 10,9                   | 3,33                                      | 4,67                                               |
| 10    | Сталь 45                                         | 38-41              | -                                                       | 11,5                   | 1,0                                       | -                                                  |
| 11    | Сталь 30ХГСА                                     | 45-50              | 10,6                                                    | 11,3                   | 1,07                                      | -                                                  |

Условия лабораторных исследований: абразив – песок крупный (67%) + глина (33%); скорость движения образцов – 2 м/с; глубина хода образцов – 14-15 см; цикл исследований – 100 ч; размеры образцов: 6×30×60 мм; толщина твердосплавного покрытия – 3 мм; повторность – трехкратная.

нительной износостойкости сплавов с добавками WC при испытаниях на машине ИМ-01 ввиду того, что зерна WC более тяжелые и опускаются при наплавке вниз, а изнашиванию подвергается верхний наружный слой.

Критерием износа на машине ИМ-01 является сравнительные весовые параметры (весовой износ), а на круговом почвенном стенде – линейные параметры (линейный износ). Абразивной массой на машине ИМ-01 служит сверхтвердый электрокорунд, а на круговом почвенном стенде – реальная почвенная масса (смесь песка и глины).

Конструкция машины трения ИМ-01 позволяет исследовать образцы при различном нагружении и, соответственно, различных удельных контактных нагрузках. Например, при нагрузке на образец 4 Н контактное давление на изнашиваемую зону образца составляет примерно 0,1 МПа.

На круговом почвенном стенде удельные нагрузки относительно постоянны и усреднено находятся в пределах 0,060-0,08 МПа. Следует отметить, что в реальных почвенных условиях удельные нагрузки могут меняться в очень широких пределах (в зависимости от состава почвы, ее предшествующей обработки, влажности, погодных условий и т.п.) – от 0,03 до 0,85 МПа [9].

Необходимо учитывать, что сравнительные показатели износостойкости очень сильно зависят от состава абразива, действующих удельных нагрузок, механизма изнашивания (микрорезание, жесткое или усталостное выкрашивание и др.) и многих

других условий. На разных стендах образцы имитируют несколько отличные условия изнашивания твердосплавных материалов. Поэтому оценка сравнительных результатов изнашивания на машине трения ИМ-01 примерно соответствует точности 80-82%, а на круговом почвенном стенде, соответственно – 90-95%.

Следовательно, с точки зрения эксплуатационной износостойкости испытания на круговом почвенном стенде являются более точными, хотя и более трудоемкими.

Однако, такой важнейший показатель, характеризующий свойства материалов, как коэффициент их относительной износостойкости  $K_{но}$ , на круговом почвенном стенде может быть определен напрямую только при сравнении монометаллических фрагментов изделий, по их линейному износу. Для биметаллических двухслойных наплавленных фрагментов этот показатель напрямую определить невозможно.

На стенде ИМ-01 коэффициент относительной износостойкости  $K_{но}$  определяется по сравнительным данным весовых износов практически для любых материалов. Тем не менее, точность определения этого параметра не очень высока. В некоторых случаях коэффициент вариации может достигать 25-35%, особенно при тестировании твердосплавных покрытий.

По этой причине для кругового почвенного стенда была разработана приближенная оценка коэффициента относительной износостойкости  $K_{но}$

испытываемых материалов для двухслойных биметаллических, упрочненных, наплавленных фрагментов почворезущих лезвий, т.е. коэффициента относительной износостойкости твердосплавного покрытия относительно материала основы.

Вначале определяется коэффициент повышения линейной износостойкости двухслойного фрагмента в сравнении с однослойным (монометаллическим), изготовленным из того же материала основы, что и у биметаллического наплавленного образца.

Определение коэффициента повышения линейной износостойкости  $K_{ли}$  материала твердосплавного покрытия осуществляется по формуле:

$$K_{ли} = \frac{U_{л\text{сер}}}{U_{л\text{оп}}},$$

где  $U_{л\text{оп}}$  – линейный износ опытного двухслойного наплавленного фрагмента;  $U_{л\text{сер}}$  – линейный износ монометаллического (серийного) фрагмента.

Определение коэффициента относительной износостойкости покрытия (твердосплавного слоя) приближенным методом осуществляется по формуле:

$$K_{ио}^{\text{пок}} \approx \frac{\sqrt{h_{ос}}}{\sqrt{h_{пок}}} \cdot K_{ли},$$

где  $K_{ио}^{\text{пок}}$  – относительная износостойкость материала покрытия;  $h_{ос}$  – толщина основы материала детали, мм;  $h_{пок}$  – толщина покрытия (твердого сплава), мм;  $K_{ли}$  – коэффициент линейной износостойкости.

При необходимости полученное значение  $K_{ио}^{\text{пок}}$  пересчитывается (корректируется) к коэффициенту относительной износостойкости стали 45 (термообработанной на 40 HRC), равному единице. То есть, полученное значение  $K_{ио}^{\text{пок}}$  умножается на отношение линейных износов  $U_{л\text{сп}}/U_{л\text{эт}}$  эталонного, из стали 45 и изготовленного из исследуемого материала основы монометаллических испытываемых фрагментов.

Данная приближенная методика основывается на известном факте пропорциональности линейного износа толщине упрочняющего слоя, взятой в степени 0,5-0,6 [7].

Результаты исследований определения износостойкости (коэффициента относительной износостойкости) одних и тех же материалов на двух стендах сравнивались между собой. При большой разнице (более 15-20%) проводятся уточняющие (дополнительные) опыты (испытания). После сопоставимых результатов можно считать, что коэффициент относительной износостойкости исследуемого материала определен с приемлемой (до 5-7% различий) точностью. При многократном получении несопоставимых (различных) результатов при лабораторных исследованиях по двум методикам выбирается результат, полученный на кру-

гом почвенном стенде, как более точный.

При этом результаты сравнительных лабораторных исследований на износостойкость оценивались как предварительные, необходимые для выбора лучших вариантов. Данные результаты должны уточняться и проверяться при проведении эксплуатационно-полевых ресурсных исследований.

Анализ результатов лабораторных исследований образцов с твердосплавными покрытиями на абразивную износостойкость (см. табл. 2 и 3) показал следующее. В целом новые разработанные твердые сплавы (с условными обозначениями ПГ-ФБ2,5Х, ПГ-ФБ3Х, ПР-Х30СР2,5НДЮ, ПР-Х30СР3НДЮ), отличающиеся в основном увеличенным легированием бора, имеют коэффициент относительной износостойкости в сравнении с лучшим относительно широко применяемым сплавом ПГ-ФБХ-6-2 усредненно (с учетом выпадающих точек) выше на 12-34%.

Наибольшие значения коэффициента относительной износостойкости  $K_{ио}$  установлены у сплава ПГ-ФБ3Х. Новые сплавы, в том числе легированные 1,5-1,7% никеля (ПР-Х30СР2,5НДЮ и ПР-Х30СР3НДЮ), несколько уступают по износостойкости новым сплавам с повышенным содержанием бора и значительным количеством марганца (ПГ-ФБ2,5Х и ПГ-ФБ3Х), особенно последнему.

Результаты лабораторных исследований подтвердили, что добавка в сплавы на железной основе литого карбида вольфрама (WC) повышает коэффициент их относительной износостойкости при эксплуатации в жесткоабразивной среде. Однако в сравнении с серийными сплавами, имеющими в своем составе относительно небольшое количество бора, для разработанных новых сплавов это повышение существенно ниже (15-26%), в то время как у серийных сплавов добавка WC повышает коэффициент их относительной износостойкости  $K_{ио}$  на 37-57% [14].

С одной стороны, этот факт означает то, что для новых сплавов с увеличенным содержанием бора (в среднем 2,55-3,2%) добавка WC менее эффективна (на грани положительной рентабельности при использовании в качестве упрочняющего слоя почворезущих деталей), с другой – что новые сплавы могут быть достаточно эффективным заменителем значительно более дорогих сплавов с содержанием карбида вольфрама.

Для проверки результатов лабораторных исследований на относительную износостойкость были проведены достаточно обширные эксплуатационно-ресурсные износные сравнительные испытания натурных наплавленных сплавов почворезущих рабочих органов. Испытания по оценке сравнительной износостойкости различных вариантов твердых сплавов проводились по четырем типам упроч-

ненных и монометаллических почворезущих рабочих органов. Наиболее полный объем испытаний проводился специализированным испытательным подразделением Владимирской государственной машиноиспытательной станции (г. Покров) по наиболее нагруженной детали – долоту лемеха отечественного плуга ЛМД-00У (рис. 2).



Рис. 2. Вид упрочненного наплавочным твердым сплавом испытуемого долота лемеха плуга ЛМВ-00У

Fig. 2. View of the tested LMB-00 U plowshare chisel reinforced with hard-alloy surfacing

Испытания проходили в Суздальском районе Владимирской области при следующих условиях: тип почвы – средний суглинок; глубина обработки – 21,8-23,5 см; предшествующая обработка почвы – дискование после уборки зерновых колосовых культур; твердость почвы на глубине обработки – 2,2-3,6 МПа. Испытывались девять вариантов упрочненных долот (табл. 4). Материал основы упрочненных наплавленных долот – Ст 30ХГСА, термообработанная до 46-51 ед. HRC ( $K_{\text{лин}} = 1,07$ ); толщина наплавленного слоя – 3,4-3,6 мм; толщина материала основы – 12 мм.

Наряду с этим были проведены эксплуатационно-ресурсные полевые сравнительные испытания еще трех типов упрочненных исследуемыми твердосплавными покрытиями почворезущих деталей: импортозамещающих лемеха и долота плуга фирмы «Лемкен» (ФРГ) и импортозамещающих ножей фрезы грядообразователей фирмы «Джон Инжиниринг» (Англия). Эти рабочие органы были упрочнены двумя видами разработанных твердых сплавов, имеющих лучшие характеристики износостойкости по результатам лабораторных исследований – ПР-ФБЗХ; ПР-ФБЗХ(70%)+WC(30%).

Результаты испытаний лемехов и долота плугов фирмы «Лемкен» (рис. 3) приведены в таблице 5.

Результаты экспериментально-ресурсных испытаний упрочненного долота плуга «Лемкен» (рис. 3с) приведены в таблице 6.

Испытания проходили в ЗАО «Раменье» (Дмитровский район, Московская обл.). Условия испытаний: почвы – легкий и средний суглинок; глубина обработки – 23-26 см; твердость почвы на глубине обработки – 2,6-3,9 МПа.

Сравнительные испытания импортозамещающих и серийных ножей фрезы грядообразователей фирмы «Джон Инжиниринг» (рис. 4) проходили в



Рис. 3. Вид изношенного (после наработки 35 га): а – серийного импортного изготовленного из высокопрочной титансодержащей стали лемеха плуга фирмы «Лемкен» (ФРГ); б – импортозамещающего лемеха плуга фирмы «Лемкен», наплавленного опытным твердым сплавом ПР-ФБЗХ; с – импортозамещающего долота плуга фирмы «Лемкен», наплавленного опытным твердым сплавом ПР-ФБЗХ

Fig. 3. View of a worn-out components (after operating 35 ha): a – serial imported plowshare made of high-strength titanium-containing steel (Lemken, Germany); b – import-substituting plowshare for Lemken plow, surfaced with experimental hard alloy PR-FBZH; c – import-substituting chisel for Lemken plows, surfaced with experimental hard alloy PR-FBZH



Рис. 4. Вид импортозамещающих ножей грядообразователя, наплавленных сплавом ПР-ФБЗХ, после наработки 60 га на машину (0,4 га на один нож)

Fig. 4. View of import-substituting ridge-forming knives, surfaced with PR-FB3Kh alloy, after operating 60 hectares of operation per machine (or 0.4 ha per knife)

ЗАО «Совхоз имени Ленина» (Ленинский район, Московская обл.). Условия испытаний: почвы – средний суглинок; глубина обработки – 12-15 см; твердость почвы на глубине обработки – 1,4-2,5 МПа.

Результаты сравнительных эксплуатационно-ресурсных испытаний ножей фрезы грядообразователя фирмы «Джон Инжиниринг» приведены в таблице 7.

Таблица 4

Table 4

**ОБОБЩЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННО-РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДОЛОТА ЛМД-00У  
С РАЗЛИЧНЫМИ ВАРИАНТАМИ УПРОЧНЕНИЯ  
CONSOLIDATED RESULTS OF COMPARATIVE PERFORMANCE AND DURABILITY TESTS OF THE LMD-00U  
PLOWSHARE CHISELS REINFORCED BY DIFFERENT METHODS**

| №<br>п/п | Марка материала, в том числе<br>упрочненного твердосплав-<br>ным покрытием | Твердость<br>упрочненного<br>слоя, ед. HRC | Линейный<br>износ долота<br>после<br>наработки<br>68 га, мм | Коэффициент линейной износостойкости |                                                                              |                                |
|----------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|          |                                                                            |                                            |                                                             | относительно<br>стали 45<br>(Л53)    | относительно<br>долота,<br>упрочненного<br>серийным<br>сплавом<br>ПР-ФБХ-6-2 | сплава<br>(расчетный<br>метод) |
| 1        | Сталь Л53 (аналог стали 45)                                                | 37-41                                      | 44                                                          | –                                    | –                                                                            | 1,0                            |
| 2        | Сплав ПГ-ФБХ-6-2 (серийный)                                                | 58-62                                      | 24                                                          | 1,83                                 | –                                                                            | 3,18                           |
| 3        | Сплав ПГ-ФБ2,5Х                                                            | 60-63                                      | 17                                                          | 2,59                                 | 1,41                                                                         | 4,48                           |
| 4        | Сплав ПГ-ФБ3Х                                                              | 62-67                                      | 15                                                          | 2,93                                 | 1,60                                                                         | 5,07                           |
| 5        | Сплав ПР-Х30СР2,5НДЮ                                                       | 60-62                                      | 23                                                          | 1,91                                 | 1,04                                                                         | 3,31                           |
| 6        | Сплав ПР-Х30СР3НДЮ                                                         | 59-62                                      | 19                                                          | 2,32                                 | 1,26                                                                         | 4,00                           |
| 7        | Сплав ПГ-ФБ3Х(70%) + WC(30%)                                               | 61-65                                      | 13                                                          | 3,38                                 | 1,85                                                                         | 5,85                           |
| 8        | Сплав ПР-Х30 СР3НДЮ<br>(70%) + WC(30%)                                     | 59-64                                      | 16                                                          | 2,75                                 | 1,50                                                                         | 4,76                           |
| 9        | Сплав ПГ-ФБХ-6-2 (серийный)<br>(70%) + WC(30%)                             | 60-63                                      | 17                                                          | 2,59                                 | 1,41                                                                         | 4,48                           |
| 9        | Сплав ПГ-ФБХ-6-2 (серийный)<br>(70%) + WC(30%)                             | 60-63                                      | 17                                                          | 2,59                                 | 1,41                                                                         | 4,48                           |

Таблица 5

Table 5

**СРАВНИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ СЕРИЙНЫХ И ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИХ УПРОЧНЕННЫХ ЛЕМЕХОВ ПЛУГОВ «ЛЕМКЕН» (ФРГ)  
COMPARATIVE RESULTS OF FIELD TESTS OF SERIAL AND IMPORT-SUBSTITUTING REINFORCED PLOWSHARES FOR LEMKEN PLOWS (GERMANY)**

| Показатель                                                                                                  | Марка материала, в том числе упрочненного твердосплавным покрытием* |               |                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------|
|                                                                                                             | Импортная сталь                                                     | Сплав ПГ-ФБ3Х | Сплав ПГ-ФБ3Х(70%) + WC(30%) |
| Твердость упрочненного слоя, ед. HRC                                                                        | 52-54                                                               | 62-65         | 61-67                        |
| Предельное значение износа лемеха<br>по лезвию после наработки 35 га, мм                                    | 23,0-24,0                                                           | 15,0-16,0     | 12,0-13,0                    |
| Среднее значение износа долота после<br>наработки 35 га, мм                                                 | 23,5                                                                | 15,5          | 12,5                         |
| Коэффициент линейной износостойкости,<br>относительно импортной высокопрочной<br>стали                      | –                                                                   | 1,52          | 1,88                         |
| Коэффициент относительной износостой-<br>кости материала (расчетный, пересчитан-<br>ный относительно Ст 45) | 1,65<br>(по данным других<br>исследований)                          | 4,92          | 6,04                         |

\* Материал основы лемехов (лист 10) и долот (лист 16) – Ст 30ХГСА; термообработка до 46-51 ед. HRC ( $K_{лин} = 1,07-1,08$ ); толщина на-  
плавленного слоя у лемеха – 2,2-2,4 мм; у долота – 3,3-3,4 мм.

Анализ результатов эксплуатационно-ресурс-  
ных натурных полевых испытаний (таблицы 4-7)  
в сопоставлении с результатами лабораторных ис-  
следований на относительную износостойкость  
(таблицы 2-4) показал, что в основном (с точностью  
80-88%) данные эксплуатационных испытаний со-  
ответствуют аналогичным результатам лаборатор-  
ных исследований.

Некоторые различия в показателях относитель-  
ной износостойкости (например, для лучших спла-  
вов ПР-ФБ3Х и ПР-ФБ3Х(70%)+WC(30%), составля-  
ющие в пределах 4,11-5,73 и 4,76-7,81 соответственно)  
объясняются как особенностями лабораторных ис-  
следований, так и общеизвестным фактом измене-  
ния коэффициента относительной износостойкости

при отличии величин действующих удельных нагру-  
зок на изделия, в частности сближения этих коэф-  
фициентов при росте нагрузок и, наоборот, некото-  
ром различии при снижении значений нагрузки [6].

Таким образом, разработанные твердые сплавы  
с повышенным уровнем легирования бором имеют  
преимущество по износостойкости перед серийны-  
ми сплавами, в частности ПГ-ФБХ-6-2, усреднено в  
пределах 12-60%. Наибольшую износостойкость  
проявил сплав ПР-ФБ3Х. Значительное повышения  
характеристик износостойкости этого сплава (а так-  
же ПР-ФБ2,5Х) объясняется увеличенным содержа-  
нием бора совместно со значительным содержа-  
нием марганца (без содержания никеля), что очевидно  
повышает прочность матрицы и твердость карбид-

Таблица 6

Table 6

**СРАВНИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ СЕРИЙНЫХ И ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИХ НАПЛАВЛЕННЫХ ДОЛОТ ПЛУГА «ЛЕМКЕН» (ФРГ)**  
**COMPARATIVE RESULTS OF FIELD TESTS OF SERIAL AND IMPORT-SUBSTITUTING FUSED BITS OF THE LEMKEN PLOW (GERMANY)**

| Показатель                                                                                        | Марка материала, в том числе упрочненного твердосплавным покрытием* |               |                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------|
|                                                                                                   | Импортная сталь                                                     | Сплав ПГ-ФБЗХ | Сплав ПГ-ФБЗХ(70%) + WC(30%) |
| Твердость упрочненного слоя, ед. HRC                                                              | 52-54                                                               | 62-65         | 62-67                        |
| Предельное значение износа долота по лезвию после наработки 35 га, мм                             | 48,5-49,5                                                           | 36,5- 37,7    | 30,5-31,5                    |
| Среднее значение износа долота после наработки 35 га, мм                                          | 49                                                                  | 37            | 31                           |
| Коэффициент линейной износостойкости, относительно импортной высокопрочной стали                  | —                                                                   | 1,33          | 1,58                         |
| Коэффициент относительной износостойкости материала (расчетный, пересчитанный относительно Ст 45) | 1,60<br>(по данным других исследований)                             | 4,38          | 5,21                         |

\*Материал основы лемехов (лист 10) и долот (лист 16) – Ст 30ХГСА; термообработка до 46-51 ед. HRC ( $K_{лин} = 1,07-1,08$ ); толщина наплавленного слоя у лемеха – 2,2-2,4 мм; у долота – 3,3-3,4 мм.

Таблица 7

Table 7

**СРАВНИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НОЖА ФРЕЗЫ КАРТОФЕЛЬНОГО И ОВОЩНОГО ГРЯДОБРАЗОВАТЕЛЯ ФИРМЫ «ДЖОН ИНЖИНИРИНГ» (АНГЛИЯ)**  
**COMPARATIVE TEST RESULTS OF THE CUTTER KNIVES OF THE POTATO AND VEGETABLE GROWER OF THE JOHN ENGINEERING (ENGLAND)**

| Показатель                                                                                        | Марка материала, в том числе упрочненного твердосплавным покрытием* |               |                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------|------------------------------|
|                                                                                                   | Импортная сталь                                                     | Сплав ПГ-ФБЗХ | Сплав ПГ-ФБЗХ(70%) + WC(30%) |
| Предельные значения износов ножа по лезвию после наработки 0,4 га на нож, мм                      | 0,75-0,85                                                           | 0,40-0,50     | 0,28-0,38                    |
| Среднее значение износа ножа после наработки 0,4 га на нож, мм                                    | 0,80                                                                | 0,45          | 0,33                         |
| Коэффициент линейной износостойкости, относительно импортной высокопрочной стали                  | —                                                                   | 1,78          | 2,43                         |
| Коэффициент относительной износостойкости материала (расчетный, пересчитанный относительно Ст 45) | 1,53-1,58<br>(по данным других исследований)                        | 5,73          | 7,81                         |

\*Материал основы опытных ножей (лист 12) – Ст 30ХГСА; термообработка до 46-51 ед. HRC ( $K_{лин} = 1,07-1,08$ ); толщина наплавочного слоя – 2,3-2,5 мм; материал серийных ненаплавленных ножей – импортная высокопрочная сталь твердостью 51-53 ед. HRC.

ных составляющих с уменьшением размеров зерна.

Опытные никельсодержащие железоуглеродные сплавы ПР-ХЗОСР2,5НДЮ и ПР-ХЗОСР3НДЮ, хотя и несколько (до 20-27%) уступают по относительной износостойкости сплаву ПР-ФБЗХ, но превосходят по износостойкости серийные сплавы и, соответственно, также могут найти применение в производстве. Кроме того, по результатам исследований установлено, что эти сплавы имеют несколько более высокие характеристики адгезии и когезии, а также пределы сопротивления хрупкому разрушению, особенно в случае толстослойной (более 3,0 мм) наплавки. Вследствие этого они могут быть эффективны при использовании упрочненных ими рабочих органов на каменистых почвах, а также для изделий с большей толщиной наплавочного упрочненного слоя.

Разработанные сплавы, особенно ПР-ФБЗХ, могут быть эффективными заменителями серийных сплавов с добавками (до 30-35%) литого карбида вольфрама (WC), с учетом того, что цена сплава с добавками WC возрастет в 2,7-3,5 раза, а цены упрочненных твердыми сплавами деталей и добавками WC, в частности

почвообрабатывающих машин, соответственно увеличиваются для различных изделий на 26-45%.

**Выводы.** В результате проведенных исследований и практических работ созданы новые сплавы, отличающиеся прежде всего повышенным (до 3,2%) содержанием бора, имеющие высокую противоизносную эффективность, что подтверждается широкой производственной проверкой в хозяйственных условиях.

Лучшие характеристики износостойкости по результатам лабораторных исследований и эксплуатационных испытаний имеет безникелевый высокомарганцовистый борсодержащий (до 3,2%) твердый сплав с условным названием ПР-ФБЗХ, имеющий коэффициент относительной износостойкости  $K_{ои}$  (относительно стали 45) в пределах 4,11-5,73, что примерно в 1,3-1,6 раз выше (при различных условиях) в сравнении с лучшим из серийных железоуглеродистых сплавов ПГ-ФБХ-6-2.

Разработанные сплавы ПР-ФБЗХ и ПР-ФБ2,5Х возможно использовать как качественные, экономически эффективные заменители серийных железоуглеродистых сплавов с добавками литого карбида вольфрама (WC).

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Миронов Д.А. Технологические методы повышения ресурса и работоспособности быстроизнашиваемых рабочих органов // *Электротехнологии и электрооборудование в АПК*. 2021. Т. 68. N4 (45). С. 118-123. DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-4-118-123.
2. Ахметшин Т.Ф., Повышение износостойкости и долговечности почвообрабатывающих рабочих органов // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2013. N3 (41). С. 81-84. EDN: QJCGHT.
3. Сидоров С.А., Зволинский В.Н. Повышение прочностных характеристик рабочих органов почвообрабатывающих машин путем защиты определенных зон от интенсивного абразивного изнашивания // *Технический сервис машин*. 2019. N1 (134). С. 179-193. EDN: EPBXHL.
4. Добрин Д.А. Актуальные технологии упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин // *Технический сервис машин*. 2022. N4. С. 111-117. DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-4-111-117.
5. Соболевский И.В., Турин Е.Н., Калафатов И.И. Повышение ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин с учетом почвенных условий республики Крым // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2021. Т. 14. N3 (70). С. 42-50. DOI: 10.53914/issn2071-2243\_2021\_3\_42.
6. Лялякин В.П., Аулов В.Ф., Ишков А.В. и др. Исследование износостойкости ножей в период эксплуатации и оценка эффективных методов их упрочнения // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2024. N1. С. 97-106. DOI: 10.31857/S0235711924010117.
7. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Сидоров С.А. и др. Использование биметаллических сталей для повышения ресурса рабочих органов сельскохозяйственных машин // *Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2013. N2. С. 80-81. EDN: QAZOOR.
8. Ерохин М.Н., Гайдар С.М., Скороходов Д.М. и др. Износостойкость низколегированных сталей в абразивной среде // *Агроинженерия*. 2023. Т. 25. N3. С. 72-78. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-72-78.
9. Sidorov S.A., Mironov D.A., Khoroshenkov V.K., Khlusova E.I. Surfacing methods for increasing the service life of rapidly wearing working tools of agricultural machines. *Welding International*. 2016. Vol. 30. N10. С. 808-812. DOI: 10.1080/09507116.2016.1148408.
10. Ожегов Н.М., Добринов А.В., Ружьев В.А. Исследование методов упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин и разработка автоматической установки для нанесения на них упрочняющих покрытий // *Современные наукоемкие технологии*. 2017. N3. С. 28-31. EDN: YIZVJR.
11. Ерохин М.Н., Новиков В.С. Прогнозирование долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин при их разработке // *Вестник МГАУ*. 2017. N6 (82). С. 56-62. EDN: USEAKL.
12. Дудников А.А., Беловод А.И., Пасюта А.Г. и др. Технологические способы повышения долговечности и ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин // *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. Т. 5. N1 (25). С. 4-7. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.48825.
13. Муртазин Г.Р., Зиганшин Б.Г., Яхин С.М. Повышение ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин // *Техника и оборудование для села*. 2015. N10. С. 32-34. EDN: UQFKOT.
14. Аулов В.Ф., Лялякин В.П., Михальченков А.М. и др. Повышение ресурса и стойкости к абразивному изнашиванию долот лемехов наплавкой электродами с бор-содержащей обмазкой // *Сварочное производство*. 2019. N7. С. 28-31. EDN: BLYOAG.
15. Лобачевский Я.П., Лискин И.В., Сидоров С.А. и др. Разработка и технология изготовления почвообрабатывающих рабочих органов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. N4. С. 3-8. EDN: WLZXPД.
16. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Мазитов Н.К. Почвообрабатывающая техника: пути импортозамещения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N2. С. 37-42. DOI: 10.22314/207375992017.2.3741.
17. Аулов В.Ф., Рожков Ю.Н., Ишков А.В. и др. Экспериментальные исследования износостойкости образцов из стали 65Г и с покрытием скоростным ТВЧ-борированием // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2018. Т. 9. N2-2. С. 507-511. DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.507-511.
18. Лискин И.В., Миронов Д.А., Курбанов Р.К. Обоснование параметров искусственной почвенной среды для лабораторного исследования изнашивания лезвия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N4. С. 37-42. DOI: 10.22314/207375992017.4.3742.

# REFERENCES

1. Mironov D.A. Technological methods of increasing the resource and efficiency of fast-wearing working bodies. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2021. Vol. 68. N4 (45). 118-123 (In Russian). DOI: 10.22314/2658-4859-2021-68-4-118-123.
2. Akhmetshin T.F. Strengthening of wear and tear resistance and durability of working devices of tilling machines. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2013. N3 (41). 81-84 (In Russian). EDN: QJCGHT.
3. Sidorov S.A., Zvolinsky V.N. Improving the strength characteristics of the working tillage machinery organs by protecting certain areas from intense abrasive wears. *Machinery Technical Service*. 2019. N1 (134). 179-193 (In Russian). EDN: EPBXHL.

4. Dobrin D.A. Relevant hardening technologies for tillage machines work tools. *Machinery Technical Service*. 2022. N4. 111-117 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2022-60-4-111-117.
5. Sobolevskiy I.V., Turin E.N., Kalafatov I.I. Resource increasing of the working bodies of tillage machinery with consideration to the soil conditions of the Republic of Crimea. *Vestnik of the Voronezh State Agrarian University*. 2021. Vol. 14. N3 (70). 42-50 (In Russian). DOI: 10.53914/issn2071-2243\_2021\_3\_42.
6. Lyalyakin V.P., Aulov V.F., Ishkov A.V. et al. Investigation of wear resistance of knives during operation and evaluation of effective methods of their hardening. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2024. N1. 97-106 (In Russian). DOI: 10.31857/S0235711924010117.
7. Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Sidorov S.A. et al. Using bimetallic steels for increasing the resource of working organs in agricultural machinery. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2024. N1. 97-106 (In Russian). DOI: 10.31857/S0235711924010117.
8. Erokhin M.N., Gaidar S.M., Skorokhodov D.M. et al. Wear resistance of low-alloy steels in the abrasive environment. *Agroengineering*. 2023. Vol. 25. N3. 72-78 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2023-3-72-78.
9. Sidorov S.A., Mironov D.A., Khoroshenkov V.K., Khlusova E.I. Surfacing methods for increasing the service life of rapidly wearing working tools of agricultural machines. *Welding International*. 2016. Vol. 30. N10. 808-812 (In English). DOI: 10.1080/09507116.2016.1148408.
10. Ozhegov N.M., Dobrinov A.V., Ruzhev V.A. Investigations of methods of strengthening the working organs of tillage machines and the development of an automatic plant for applying hardening coatings on them. *Modern High-tech Technologies*. 2017. N3. 28-31 (In Russian). EDN: YIZVJR.
11. Erokhin M.N., Novikov V.S. Forecasting durability of working elements of designed soil-cultivating machines. *Bulletin of MGAU*. 2017. N6 (82). 56-62 (In Russian). EDN: USEAKL.
12. Dudnikov A.I., Belovod A., Pasuta A. et al. Technological methods of increasing the durability and resource of working parts of tillage machines. *Technology Audit and Production Reserves*. 2015. Vol. 5. N1 (25). 4-7 (In Russian). DOI: 10.15587/2312-8372.2015.48825.
13. Murtazin G.R., Ziganshin B.G., Jakhin S.M. Resource increase of operative parts of tillage machines. *Machinery and Equipment for Rural Areas*. 2015. N10. 32-34 (In Russian). EDN: UQFKOT.
14. Aulov V.F., Lyalyakin V.P., Mikhailchenkov A.M. et al. Increase of the resource and resistance to abrasive wear of plow chisels by deposition with boron-containing coating electrodes. *Welding Production*. 2019. N7. 28-31 (In Russian). EDN: BLYOAQ.
15. Lobachevskiy Ya.P., Liskin I.V., Sidorov S.A. et al. Working out and production technique of soil cultivating working tools. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2016. N4. 3-8 (In Russian). EDN: WLZXP.
16. Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Mazitov N.K. Soil-Cultivating machinery: ways of import substitution. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017. N2. 37-42 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2017-2-37-41.
17. Aulov V.F., Rozhkov Yu.N., Ishkov A.V. et al. Experimental study of wear resistance of samples from steel 65g and samples coated with high-speed high-frequency current boriding. *Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2018. Vol. 9. N2-2. 507-511 (In Russian). DOI: 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.507-511.
18. Liskin I.V.I., Mironov D.A.I., Kurbanov R.K. Justification of parameters artificial soil for laboratory research of cutting edge wear. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017. N4. 37-42 (In Russian). DOI: 10.22314/207375992017.4.3742.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Заявленный вклад соавторов:

Лобачевский Я.П. – научное руководство, формирование основных направлений исследования;

Миронов Д.А. – сбор и анализ аналитических и практических материалов, формирование общих выводов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Coauthors' contribution:

Lobachevsky Ya. P. – scientific supervision, defining the main research perspectives;

Mironov D.A. – gathering and analyzing research and practical materials, formulating general conclusions.

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

02.04.2025

12.05.2025

EDN: GKNLWD

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-64-71



Научная статья

УДК 631.171:004



## Автоматизированный машинно-тракторный агрегат для кормопроизводства

Захид Адыгезалович Годжаев<sup>1</sup>,

доктор технических наук, член-корреспондент РАН,  
главный научный сотрудник,  
e-mail: fic51@mail.ru;

Сергей Анатольевич Васильев<sup>2,3</sup>,

доктор технических наук,  
заведующий кафедрой,  
e-mail: vsa\_21@mail.ru;

Сергей Александрович Мишин<sup>2</sup>,

старший преподаватель,  
e-mail: supers.ya@yandex.ru;

Евгений Валентинович Рузанов<sup>4</sup>,

генеральный директор,  
e-mail: ruza2005@yandex.ru

<sup>1</sup>Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Российская Федерация;

<sup>2</sup>Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары, Российская Федерация;

<sup>3</sup>Нижегородский государственный инженерно-экономический университет; г. Княгинино, Российская Федерация;

<sup>4</sup>ООО «Фарватер», г. Красногорск, Московская область, Российская Федерация

**Реферат.** Точное земледелие значительно развивается в последние годы благодаря достижениям в области роботизации и автоматизации. В научной статье разработали автоматизированный сельскохозяйственный машинно-тракторный агрегат (МТА) путем использования универсальных мехатронных модулей систем его управления для скашивания трав. *(Цель исследования)* Разработать функционально-технологическую схему автоматизированного МТА и универсальные мехатронные модули, устанавливаемые на механические органы управления оператора, для автоматического выполнения технологического процесса скашивания трав. *(Материалы и методы)* Разработана функционально-технологическая схема МТА. Машинно-тракторный агрегат состоит из системы дистанционного управления, трактора, системы контроля и управления доступом (СКУД) к МТА и технологической машины. Описана методика автоматического управления МТА на агроландшафте. Выполнено теоретическое обоснование конструктивно-технологических параметров универсальных мехатронных модулей для управления сцеплением и тормозной системой. Проведен расчет механизма мехатронного модуля и определены: передаточное отношение винтовой передачи, ход винта и скорость перемещения гайки. Установлена зависимость изменения скорости хода педали (угла перемещения педали) от скорости перемещения гайки мехатронного модуля воздействия. Разработано программное обеспечение на языке программирования для контроллера управления универсальными мехатронными модулями. *(Результаты и обсуждение)* Дистанционным способом, используя пульт оператора, реализовали автоматическое управление МТА, в составе колесного трактора ЛТЗ-120Б + роторной косилки КРН-2,4, на агроландшафте. Провели полевое тестирование взаимодействия программы с аппаратной частью универсальных мехатронных модулей систем управления МТА. Сравнительные экспериментальные исследования с оператором и в автоматическом режиме (с применением мехатронных приводов) проведены при выполнении операции кошения травы машинно-тракторным агрегатом при прямолинейном движении. *(Выводы)* Предварительные исследования автоматизированного сельскохозяйственного машинно-тракторного агрегата показали, что значения эксплуатационных показателей при работе с косилкой находятся в допустимых пределах, например производительность за 1 час основного времени составила 3,56 гектара, рабочая скорость движения –  $10 \pm 0,3$  км/ч, а высота среза трав –  $8 \pm 1$  сантиметров.

**Ключевые слова:** автоматизация, машинно-тракторный агрегат, универсальные, мехатронные модули, системы управления, скашивание трав

■ **Для цитирования:** Годжаев З.А., Васильев С.А., Мишин С.А., Рузанов Е.В. Автоматизированный машинно-тракторный агрегат для кормопроизводства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №2. С. 64-71. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-64-71. EDN: GKNLWD.

Scientific article

## Automated Machine-Tractor Unit for Grass Mowing

Zakhid A. Godzhaev<sup>1</sup>,

Dr.Sc.(Eng.), corresponding member of the Russian  
Academy of Sciences, chief researcher,  
e-mail: fic51@mail.ru;

Sergey A. Vasilyev<sup>2,3</sup>,

Dr.Sc.(Eng.), senior lecturer,  
e-mail: vsa\_21@mail.ru;

**Sergey A. Mishin<sup>2</sup>**,  
assistant lecturer,  
e-mail: supers.ya@yandex.ru;

**Evgeny V. Ruzanov<sup>4</sup>**,  
general director,  
e-mail: ruza2005@yandex.ru

<sup>1</sup>Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup>Chuvash State University named after I.N. Ulyanov, Cheboksary, Chuvash Republic, Russian Federation;

<sup>3</sup>Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Nizhny Novgorod Region, Russian Federation;

<sup>4</sup>Farvater LLC, Krasnogorsk, Moscow region, Russian Federation

**Abstract.** Recent advancements in robotics and automation have significantly contributed to the progress of precision agriculture. This study presents the development of an automated machine-tractor unit (MTU) designed for grass mowing, incorporating universal mechatronic control modules. (*Research purpose*) The purpose of this research is to design a functional and technological scheme for an automated machine-tractor unit and to develop universal mechatronic modules that can be mounted onto the mechanical control elements typically operated by a human driver. These modules are intended to enable the automated execution of the grass mowing process. (*Materials and methods*) A functional and technological scheme of the machine-tractor unit was developed. The unit consists of a remote control system, a tractor, an access control and management system (ACMS), and a technological implement. The methodology for the automatic control of the machine-tractor unit in an agro-landscape was described. A theoretical justification was provided for the design and technological parameters of the universal mechatronic modules used to control the clutch and braking systems. Calculations were conducted for the mechatronic module mechanism, including the determination of the screw drive gear ratio, screw travel, and nut displacement speed. A functional relationship was established between the pedal stroke velocity (change in pedal angle) and the nut displacement speed in the mechatronic actuation module. Control software for the universal mechatronic modules was developed using a programming language suitable for the selected controller. (*Results and discussion*) Automatic control of the machine-tractor unit was successfully implemented in an agro-landscape setting using a remote control panel, an LTZ-120B wheeled tractor, and a KRN-2.4 rotary mower. Field tests were conducted to evaluate the interaction between the control software and the hardware components of the universal mechatronic control modules. Comparative experimental studies were performed during straight-line mowing operations to evaluate the system performance under both manual control (with an operator) and automated control (using mechatronic actuators). (*Conclusions*) Preliminary tests of the automated agricultural machine-tractor unit demonstrated that its operational performance indicators remained within acceptable limits during mower-assisted operations. Specifically, the system achieved a productivity rate of 3.56 hectares per hour of effective operation, maintained a working speed of  $10 \pm 0.3$  kilometers per hour, and ensured a grass cutting height of  $8 \pm 1$  centimeters.

**Keywords:** automation, machine-tractor unit, universal, mechatronic modules, control systems, grass mowing

■ **For citation:** Godzhaev Z.A., Vasiliev S.A., Mishin S.A., Ruzanov E.V. Automated machine-tractor unit for grass mowing. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N2. 64-71. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-64-71. EDN: GKNLWD.

**Т**очное земледелие значительно развивается в последние годы благодаря достижениям в роботизации и автоматизации [1]. Более низкие производственные затраты, меньшая зависимость от ручного труда и более надежное качество урожая становятся реальностью при использовании автоматизированных тракторов и сельскохозяйственных машин [2].

Автоматизация функций сельскохозяйственных машин возникла в 1980-е годы, когда зародилась концепция точного земледелия [3]. В настоящее время автономные системы очень полезны, потому что они упрощают повседневные задачи человека [4]. В ряде работ [5] предлагается ускорить внедрение технологических инноваций в области интеллектуального сельскохозяйственного машиностроения, что обеспечит беспилотное управление наземной техникой [6]. В то же время авто-

матизация агротехнических операций является важной технической основой в условиях дефицита трудовых ресурсов и снижения интенсивности труда в агропроизводстве [7]. Например, компания *New Holland* разработала трактор *NH Drive*, который автономно выполняет различные дневные и ночные операции [8]. Работу можно контролировать дистанционно с планшета или из кабины трактора, без непосредственного наблюдения оператора.

На сайте завода-изготовителя *Yanmar* представлен проект *Robot Tractor* [9]. Система автоматизированного рулевого управления основана на информации о позиционировании трактора на поле хозяйства. Также используется система электронного поводка, когда оператор управляет в реальном времени двумя тракторами: одним непосредственно вручную, а вторым через электронную систему автоматизированного рулевого управления [8].

Ряд технических решений по автоматизации управления [10] позволяет вывести проекты по беспилотным тракторам на стадию прототипов [11] с возможностью выполнения таких агротехнических операций [12], как обработка почвы [13], сбор урожая [14], опрыскивание, кошение культур [15], в том числе на склоновых землях [16]. Хотя некоторые агроприемы могут быть особенно сложными для полной автоматизации [17].

Эффективность автоматизированных мобильных энергетических средств [18] в большей степени будет проявляться в повышении производительности полевых операций [19] и оптимизации управления технологическими процессами [20] для решения проблем цифрового АПК [21].

**Цель исследований.** Разработка функционально-технологической схемы автоматизированного машинно-тракторного агрегата (МТА) и универсальных мехатронных модулей, устанавливаемых на механические органы управления оператора, для автоматического выполнения технологического процесса скашивания трав.

**Материалы и методы.** Тягово-скоростные характеристики МТА при выполнении технологического процесса скашивания трав выразим с помощью мощностного баланса для тягово-приводного агрегата:

$$N_e = \sum_{i=1}^n N_i = \sum_{i=1}^n F_i V, \quad (1)$$

$$V = \frac{N_e}{\sum_{i=1}^n F_i}, \quad (2)$$

где  $N_i$  – потери мощности на преодоление сопротивлений во время движения, кВт;  $F_i$  – силы сопротивлений во время движения, Н;  $V$  – рабочая скорость перемещения, м/с;  $N_e$  – эффективная мощность двигателя трактора, кВт.

После преобразований рабочая скорость перемещения тягово-приводного агрегата с косилкой

$$V = \frac{\left( N_e - \frac{N_{\text{вoм}}}{\eta_{\text{вoм}}} \right) \eta_m \eta_{\delta}}{F_f + F_{\alpha} + F_M}, \quad (3)$$

$$F_f = fG \cos \alpha, \quad (4)$$

$$F_{\alpha} = \pm G \sin \alpha, \quad (5)$$

$$F_M = \kappa_M B_p, \quad (6)$$

где  $N_{\text{вoм}}$  – затраты мощности на привод вала отбора мощности (ВОМ), кВт;  $\eta_m$  – механический КПД ВОМ, кВт;  $\eta_{\delta}$  – механический КПД трансмиссии трактора;  $\eta_{\delta}$  – КПД, учитывающей потери мощности на буксование;  $F_f$  – сопротивление перекачиванию МТА, кН;  $F_{\alpha}$  – сопротивление спуску или подъ-

ему МТА, кН;  $F_M$  – тяговое сопротивление роторной косилки, кН;  $f$  – коэффициент сопротивления перекачиванию МТА;  $G$  – общий вес МТА, кН;  $\alpha$  – продольный уклон по ходу МТА, град;  $r_m$  – удельное сопротивление роторной косилки, кН/м;  $B_p$  – конструктивная ширина захвата косилки, м.

Подставим выражения (4)–(6) в уравнение (3) и с учетом КПД трансмиссии трактора для прямого и заднего хода получим скорости перемещения МТА с косилкой для этих режимов:

$$V_n = \frac{\left( N_e - \frac{N_{\text{вoм}}}{\eta_{\text{вoм}}} \right) \eta_m \eta_{\delta}}{G(f \cos \alpha \pm \sin \alpha) + \kappa_M B_p}, \quad (7)$$

$$V_z = \frac{N_e \eta_{m3} \eta_{\delta}}{G(f \cos \alpha \pm \sin \alpha) + \kappa_M B_p}, \quad (8)$$

где  $\eta_{\text{тп}}$  и  $\eta_{\text{тз}}$  – механический КПД трансмиссии трактора для прямого и заднего хода.

Время, затраченное на совершение агрегатом одного цикла рабочего хода на сельскохозяйственном поле, определится в соответствии с выражением (3) по формуле:

$$t_p = \frac{G(f \cos \alpha \pm \sin \alpha) + \kappa_M B_p}{\left( N_e - \frac{N_{\text{вoм}}}{\eta_{\text{вoм}}} \right) \eta_{\delta}} \cdot \frac{l_p}{\eta_m}. \quad (9)$$

А для холостого хода МТА на повороте (например, «ласточкин хвост») аналогично можно использовать выражение:

$$t_x = \frac{G(f \cos \alpha \pm \sin \alpha) + \kappa_M B_p}{N_e \eta_{\delta}} \cdot \left( \frac{l_{xn}}{\eta_{mn}} + \frac{l_{xz}}{\eta_{m3}} \right), \quad (10)$$

где  $N_{\text{вoмх}}$  – затраты мощности на привод ВОМ при холостом ходе, кВт.

Эффективная мощность двигателя может быть выражена через кинематические параметры трансмиссии

$$N_e = M_e \frac{\omega_k}{i_m} \eta_m, \quad (11)$$

где  $M_e$  – эффективный крутящий момент, Нм;  $\omega_k$  – угловая скорость вращения ведущего колеса, м/с;  $i_{\text{т}}$  – передаточное отношение трансмиссии.

Из полученных выражений видно, что к основным регулируемым параметрам, влияющим на скорость перемещения МТА, можно отнести:

- передаточные числа прямой  $i_{\text{тп}}$  и задней  $i_{\text{тз}}$  передач;
- КПД трансмиссии прямой  $\eta_{\text{тп}}$  и задней  $\eta_{\text{тз}}$  передач;
- периодическую передачу мощности на привод ВОМ  $N_{\text{вoм}}$  и КПД  $\eta_{\text{вoм}}$ .

Для описания способа автоматического управления этими параметрами на агроландшафте приведена функционально-технологическая схема роботизированного МТА (рис. 1).

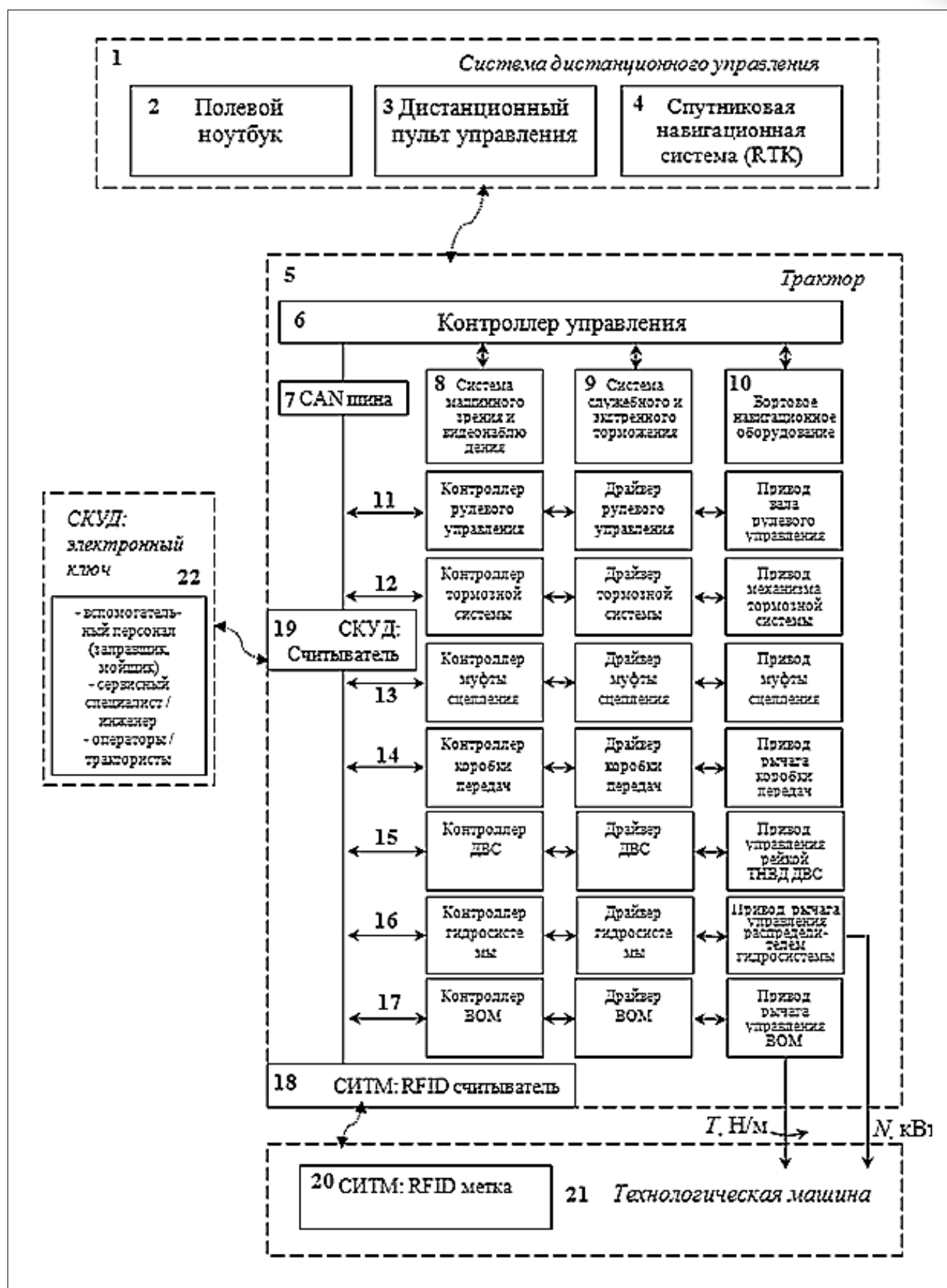


Рис. 1. Функционально-технологической схемы МТА

Fig. 1. Functional and technological diagram of the machine-tractor unit

Обозначения к *таблице 1*: 1 – система дистанционного управления; 2 – полевой ноутбук; 3 – дистанционный пульт управления; 4 – спутниковая навигационная система; 5 – трактор; 6 – контроллер управления; 7 – CAN-шина; 8 – система машинного зрения и видеонаблюдения; 9 – система служебного и экстренного торможения; 10 – бортовое навигационное оборудование; 11 – мехатронный модуль, включающий контроллер, драйвер и привод вала рулевого управления; 12 – мехатронный модуль, включающий контроллер, драйвер и привод механизма тормозной системы; 13 – мехатронный модуль, включающий контроллер, драйвер и привод муфты сцепления; 14 – мехатронный модуль, включающий контроллер, драйвер и привод рычага коробки перемены передач; 15 – мехатронный модуль, включающий контроллер, драйвер и привод управления рейкой топливного насоса высокого давления (ТНВД) двигателя внутреннего сгорания (ДВС); 16 – мехатронный модуль, включающий контроллер, драйвер и привод рычага управления распределителем гидравлической системы; 17 – мехатронный модуль, включающий контроллер, драйвер и привод рычага управления вала отбора мощности (ВОМ); 18 – *RFID* считыватель; 19 – считыватель системы контроля и управления доступом (СКУД) к РМТА; 20 – *RFID* метка на корпусе технологической машины; 21 – технологическая машина; 22 – электронный ключ СКУД на руках эксплуатирующих лиц

Машинно-тракторный агрегат состоит из системы дистанционного управления, трактора, системы контроля и управления доступом (СКУД) к МТА и технологической машины.

Внешний режим за счет передачи сигналов системы дистанционного управления с пульта реализован следующим образом. Если водитель (оператор) находится на расстоянии до 40 км от РМТА для обеспечения радиосвязи, система позволяет держать стабильную передачу информации на расстояние 15-20 км. Применяя пульт, оператор обеспечивает функционирование РМТА, т.е. формирует команды на включение мехатронного привода движения управляющих звеньев агрегатов и узлов.

В таком режиме рекомендуется, чтобы трактор находился в зоне видимости или шаговой доступности от оператора. При большем расстоянии дополнительно используются размещенная в кабине камера *BOSCAM Explorer HD19 Plus*. Эта 5-мегапиксельная камера позволяет снимать с качеством *Full 1080P HD* (1920×1080) до 30 кадров в секунду с углом обзора 146 град. Используются *VR*-очки *Skyzone SKY03 Oled* (1024×768) с ярким цветом и высокой контрастностью, что позволяет оператору видеть больше деталей и красок, а новый оптический элемент делает картинку кристально чистой, без искажений и размытости.

Например, оператор путем нажатия кнопок и управления стиками пульта управления последовательно передает информацию через радиointерфейс на контроллер управления МТА. По *CAN*-шине информация последовательно направляется на контроллеры систем управления. При запуске двигателя оператор нажимает кнопку «Выжать сцепление» и информация передается на контроллер муфты сцепления → драйвер муфты сцепления → привод муфты сцепления, который выжимает педаль сцепления. Далее оператор нажимает кнопку «Запуск двигателя», сигнал подается на контроллер двигателя и замыкается контакт на его запуск, контакт приходит в положение «Работа». Устанавливаются обороты ДВС в течение некоторого времени, оператор на экране контролирует показания приборов по обратной связи.

После прогрева охлаждающей жидкости для начала движения оператор нажимает на стик пульта «Управление навеской» и программа передает сигнал на контроллер управления. По *CAN*-шине информация направляется на контроллер гидросистемы → драйвер гидросистемы → привод гидросистемы для подъема навесного оборудования (например, косилки). Оператор нажимает на стик «Тормозная система», сигнал направляется на контроллер тормозной системы → драйвер тормозной системы → привод тормозной системы, который отключает стояночный тормоз. После нажатия на кнопку «Выжать сцепление» сигнал направляется на контроллер муфты сцепления → драйвер муфты сцепления → привод муфты сцепления, выжимает педаль сцепления.

Аналогичным образом осуществляются остальные команды и действия.

**Результаты и обсуждение.** Согласно полученной функционально-технологической схемы МТА необходимо теоретически обосновать конструктивно-технологические параметры универсальных мехатронных модулей [15], устанавливаемых на механические органы управления оператора для приводов систем управления. Структурная схема и общий вид универсального мехатронного модуля привода управления системы включения сцепления, как пример, показан на *рисунке 2*.

В разработанных универсальных мехатронных модулях используется винтовая передача. Передаточное отношение винтовой передачи для узла управления системой тормоза и сцепления находится по формуле:

$$i = \frac{\pi d}{s}, \quad (12)$$

где  $d$  – диаметр окружности, по которой перемещается точка приложения силы, м;  $s$  – ход винта, м.

Ход винта:

$$s = t \cdot k, \quad (13)$$

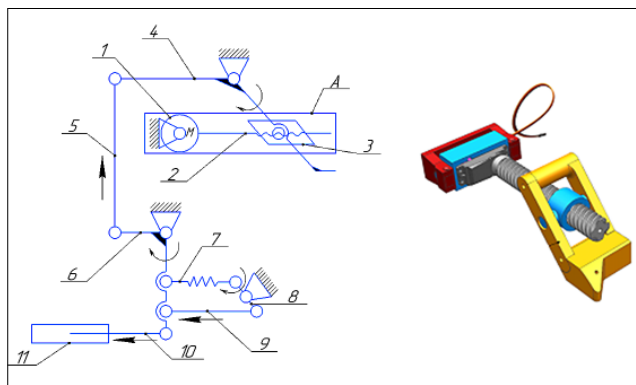


Рис. 2. Мехатронный модуль привода управления системы включения сцепления: 1 – сервопривод; 2 – винт; 3 – гайка с шарниром; 4, 6, 9 – коромысла; 5, 8 – шарниры; 7 – пружина; 10 – шток; 11 – пневмоцилиндр; А – мехатронный модуль воздействия

Fig. 2. Mechatronic drive module for the clutch engagement control system: 1 – servomotor; 2 – lead screw; 3 – nut with joint; 4, 6, 9 – rocker arms; 5, 8 – joints; 7 – spring; 10 – connecting rod; 11 – pneumatic cylinder; A – mechatronic actuation module

где  $t$  – шаг резьбы, м;  $k$  – число заходов резьбы.

Скорость перемещения гайки по винту для винтовой передачи

$$V_z = n_g k t, \quad (14)$$

где  $n_g$  – частота вращения ходового винта.

Известно, что за 0,13 секунды при 8,4 В винт совершает поворот на  $60^\circ$ . При данном напряжении достигается наиболее высокая эффективность работы сервопривода. После подстановки данных  $k=4$ , частота вращения ходового винта равна 79 об/мин, получим  $3,4$ ,  $s = 28$  мм, 8848 мм/мин.

По выявленным зависимостям определены рациональные конструктивно-технологические параметры разрабатываемого мехатронного модуля воздействия. На основании сконструированных сборочных единиц была построена общая сборочная 3D модель узлов, отвечающих за управление приводами сцепления и тормоза (см. рис. 2).

Предварительные опыты успешно проведены на территории Чувашского НИИСХ – филиала ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока. Фрагмент тестирования системы автоматизированного МТА с косилкой представлен на рисунке 3.

Сравнительные экспериментальные исследования с оператором и в беспилотном режиме (с применением мехатронных приводов) проводились при выполнении операции кошения травы машинно-тракторным агрегатом ЛТЗ-120Б + КРН-2,4 при прямолинейном движении.

Предварительные исследования роботизированного машинотракторного агрегата показали, что значения эксплуатационных показателей при рабо-



Рис. 3. Тестирования системы автоматизированного МТА с косилкой

Fig. 3. Field testing of the automated machine-tractor unit equipped with a mower

те с косилкой находятся в допустимых пределах, например, производительность за 1 ч основного времени составила 3,56 га, рабочая скорость движения –  $10 \pm 0,3$  км/ч, высота среза травы –  $8 \pm 1$  см.

**Выводы.** Разработан автоматизированный сельскохозяйственный машинно-тракторный агрегат с использованием универсальных мехатронных модулей систем управления для скашивания трав. Агрегат состоит из системы дистанционного управления, трактора, системы контроля и управления доступом к МТА и технологической машины. Описана методика автоматического управления МТА на агроландшафте. Выполнено теоретическое обоснование конструктивно-технологических параметров универсальных мехатронных модулей для управления сцеплением и тормозной системой. Проведен расчет механизма мехатронного модуля и определены: передаточное отношение винтовой передачи, ход винта и скорость перемещения гайки. Разработано программное обеспечение на языке программирования для контроллера управления универсальными мехатронными модулями. Дистанционным способом, используя пульт оператора, реализовали автоматическое управление колесного трактора ЛТЗ-120Б и роторной косилки КРН-2,4 на агроландшафте. Провели полевое тестирование взаимодействия программы с аппаратной частью универсальных мехатронных модулей систем управления МТА. Сравнительные экспериментальные исследования с оператором и в автоматическом режиме (с применением мехатронных приводов) проведены при выполнении операции кошения травы машинно-тракторным агрегатом при прямолинейном движении. Предварительные исследования автоматизированного сельскохозяйственного машинно-тракторного агрегата показали, что значения эксплуатационных показателей при работе с косилкой находятся в допустимых пределах, например производительность за 1 час основного времени составила 3,56 га, рабочая скорость движения –  $10 \pm 0,3$  км/ч, а высота среза трав –  $8 \pm 1$  см.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Ren X., Huang B., Yin H. A review of the large-scale application of autonomous mobility of agricultural platform. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. 206. 107628. DOI: 10.1016/j.compag.2023.107628.
- Noguchi N. Agricultural vehicle robot. *Journal of Robotics and Mechatronics*. 2018. 30(2). 165-172. DOI: 10.20965/jrm.2018.p0165.
- Bochtis D.D., Sorensen C.G.C., Busato P. Advances in agricultural machinery management: A review. *Biosyst. Eng.* 2014. 126. 69-81. DOI: 10.1016/j.biosystem-seng.2014.07.012.
- Plessen M.G., Bemporad A. Reference trajectory planning under constraints and path tracking using linear time-varying model predictive control for agricultural machines. *Biosyst. Eng.* 2017. 153. 28-41. DOI: 10.1016/j.biosystem-seng.2016.10.019.
- Bai Y. et al. Vision-based navigation and guidance for agricultural autonomous vehicles and robots: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. 205. 107584. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107584.
- Годжаев З.А., Гришин А.П., Гришин А.А., Гришин В.А. Беспилотное мобильное энергосредство сельскохозяйственного назначения // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. N10. С. 41-44. EDN: WWHVXJ.
- Liu L. et al. Path planning techniques for mobile robots: Review and prospect. *Expert Syst. Appl.* 2023. 227. 120254. DOI: 10.1016/j.eswa.2023.120254.
- Alberto-Rodriguez A. et al. Review of control on agricultural robot tractors. *Int. J. Comb. Optim. Probl. Inform.* 2020. 11. 9-20.
- Heikkilä M. et al. Unmanned agricultural tractors in private mobile. *Networks*. 2022. 2. 1-20. DOI: 10.3390/network2010001.
- Ненайденко А.С., Поддубный В.И., Валекжанин А.И. Моделирование управления движением колесной сельскохозяйственной машины в режиме реального времени // *Тракторы и сельхозмашины*. 2018. N3. С. 32-38. EDN: XSEMKD.
- Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. и др. О синтезе роботизированного сельскохозяйственного мобильного агрегата // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2019. N4. С. 63-68. EDN: GBEQZI.
- Бейлис В.М., Ценч Ю.С., Коротченя В.М., Старовойтов С.И., Кынев Н.Г. Тенденции развития прогрессивных машинных технологий и техники в сельскохозяйственном производстве // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N4 (33). С. 150-156. EDN: YTHPID.
- Yin X., Du J., Geng D., Jin C. Development of an automatically guided rice transplanter using RTK-GNSS and IMU. *IFAC PapersOnLine*. 2018. 51. 374-378. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.193.
- Han J.-H. et al. Performance evaluation of an autonomously driven agricultural vehicle in an orchard environment. *Sensors*. 2021. 22. 114. DOI: 10.3390/s22010114.
- Qiao N. et al. An improved path-tracking controller with mid-angle adaptive calibration for combine harvester. *J. Instrum.* 2020. 15. P1025. DOI: 10.1088/1748-0221/15/01/P01025.
- Васильев С.А., Васильев А.А., Затылков Н.И. Противозероизонная контурная обработка почвы машинно-тракторными агрегатами на агроландшафтах склоновых земель // *Вестник НГИЭИ*. 2018. N 5 (84). С. 43-54. EDN: XNDFZR.
- Годжаев З.А., Шевцов В.Г., Лавров А.В. и др. Стратегия машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России до 2030 года (Прогноз) // *Технический сервис машин*. 2019. N4(137). С. 220-229. EDN: DMOGNR.
- Blok P. et al. Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N157. 261-269. DOI: 10.1016/j.compag.2018.12.046.
- Kim D. H. et al. Analysis of driving performance evaluation for an unmanned. *IFAC PapersOnLine*. 2018. 51-17. 227-231. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.149. (In English).
- Измайлов А. Ю., Лобачевский Я. П., Хорошенков В.К. и др. Оптимизация управления технологическими процессами в растениеводстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N3. С. 4-11. DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-3-4-11.
- Кряжков В.М., Годжаев З.А., Шевцов В.Г. и др. Проблемы формирования инновационного парка сельскохозяйственных тракторов России // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. N3. С. 9-14. EDN: TTLVRR.

# REFERENCES

- Ren X., Huang B., Yin H. A review of the large-scale application of autonomous mobility of agricultural platform. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. 206. 107628 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2023.107628.
- Noguchi N. Agricultural vehicle robot. *Journal of Robotics and Mechatronics*. 2018. 30(2). 165-172 (In English). DOI: 10.20965/jrm.2018.p0165.
- Bochtis D.D., Sorensen C.G.C., Busato P. Advances in agricultural machinery management: A review. *Biosyst. Eng.* 2014. 126. 69-81(In English). DOI: 10.1016/j.biosystem-seng.2014.07.012.
- Plessen M.G., Bemporad A. Reference trajectory planning under constraints and path tracking using linear time-varying model predictive control for agricultural machines. *Biosyst. Eng.* 2017. 153. 28-41 (In English). DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.10.019.
- Bai Y. et al. Vision-based navigation and guidance for agricultural autonomous vehicles and robots: A review.

- Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. 205. 107584 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2022.107584.
6. Gojaev Z.A., Grishin A.P., Grishin A.A., Grishin V.A. Unmanned mobile power unit for agricultural purposes. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2016. N10. 41-44 (In Russian). EDN: WWHVXJ.
  7. Liu L. et al. Path planning techniques for mobile robots: Review and prospect. *Expert Syst. Appl.* 2023. 227. 120254 (In English). DOI: 10.1016/j.eswa.2023.120254.
  8. Alberto-Rodriguez A. et al. Review of control on agricultural robot tractors. *Int. J. Comb. Optim. Probl. Inform.* 2020. 11. 9-20 (In English).
  9. Heikkilä M. et al. Unmanned agricultural tractors in private mobile. *Networks*. 2022. 2. 1-20 (In English). DOI: 10.3390/network2010001.
  10. Nenajdenko A.S., Poddubnyj V.I., Valekzhanin A.I. modeling the movement control of a wheeled agricultural machine in real time. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2018. N3. 32-38 (In Russian). EDN: XSEMKD.
  11. Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.A.P., Tsench Yu.S., et al. About synthesis of robotic agriculture mobile machine. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2019. N4. 63-68 (In Russian). DOI: 10.30850/vrsn/2019/4/63-68.
  12. Beylis V.M., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M. et al. Trends in the development of advanced machine technologies and techniques in agricultural production. *Vestnik VIESH*. 2018. N4(33). 150-156 (In Russian). EDN: YTHPID.
  13. Yin X., Du J., Geng D., Jin C. Development of an automatically guided rice transplanter using RTK-GNSS and IMU. *IFAC PapersOnLine*. 2018. 51. 374-378 (In English). DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.193.
  14. Han J.-H. et al. Performance evaluation of an autonomously driven agricultural vehicle in an orchard environment. *Sensors*. 2021. 22. 114 (In English). DOI: 10.3390/s22010114.
  15. Qiao N. et al. An improved path-tracking controller with mid-angle adaptive calibration for combine harvester. *J. Instrum.* 2020. 15. P1025 (In English). DOI: 10.1088/1748-0221/15/01/P01025.
  16. Vasilyev S.A., Vasilyev A.A., Zatytkov N. Anti-erosion contour tillage machine-tractor units on the agricultural landscapes of sloping land. *Vestnik NGIEHI*. 2018. N5 (84). 43-54 (In Russian). EDN: XNDFZR.
  17. Godzhaev Z.A., Shevtsov V.G., Lavrov A.V. et al. strategy of russian agricultural machinery modernization until 2030 (forecast). *Machinery Technical Service*. 2019. N4(137). 220-229 (In Russian). EDN: DMOGMR.
  18. Blok P. et al. Robot navigation in orchards with localization based on Particle filter and Kalman filter. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. N157. 261-269 (In English). DOI: 10.1016/j.compag.2018.12.046.
  19. Kim D.H. et al. Analysis of driving performance evaluation for an unmanned. *IFAC PapersOnLine*. 2018. 51-17. 227-231 (In English). DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.149.
  20. Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Khoroshenkov V.K. et al. Optimization of technological process management in plant growing. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2018. Vol. 12. N3. 4-11 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2018-12-3-4-11.
  21. Kryazhkov V.M., Godzhaev Z.A., Shevtsov V.G. et al. Problems of formation of russian innovative agricultural tractors fleet. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2015. N3. 9-14 (In Russian). EDN TTLVRR.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Заявленный вклад соавторов:

- З.А. Годжаев – постановка задачи, обоснование математических моделей и технический средств;  
 С.А. Васильев – формулирование основной концепции исследования, разработка методологии исследования, формирование выводов;  
 С.А. Мишин – графическое представление результатов, описание результатов и формирование выводов исследования;  
 Е.В. Рузанов – подготовка начального варианта текста, анализ литературы.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Coauthors' contribution:

- Godzhaev Z.A. – problem statement, substantiation of mathematical models and technical means;  
 Vasiliev S.A. – development of the main research concept, research methodology design, formulation of conclusions;  
 Mishin S.A. – graphical representation and description of the results, formulation of conclusions;  
 Ruzanov E.V. – preparation of the initial manuscript draft, literature review.

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

16.10.2024

27.05.2025

EDN: HEHDGH

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-72-77



Научная статья

УДК 633.2.039.6



## Лабораторно-полевые исследования высевальной системы при мозаичном посеве

**Антон Сергеевич Фирсов,**

кандидат технических наук, доцент,

e-mail: sevenrom777@yandex.ru;

**Иван Валентинович Сизов,**

кандидат технических наук, доцент,

e-mail: ivan.sizov.1976@mail.ru;

**Лариса Николаевна Пак,**

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент,

e-mail: pak\_lar@bk.ru

Тверская государственная сельскохозяйственная академия, г. Тверь, Российская Федерация

**Реферат.** Отметим актуальность задачи повышения продуктивности полевых угодий. Получение сбалансированной кормовой массы зависит от выбора сельскохозяйственной культуры, способа и качества посева. (*Цель исследования*) Определить значимые факторы степень их влияния на конструктивные параметры и режимы работы высевальной аппаратуры. (*Материалы и методы*) Использовалась сеялка СН-16 с модернизированным бункером для выполнения операции мозаичного посева. При планировании эксперимента за значимые факторы принимались скорость движения ленты, посевная культура, форма бункера. Под откликом подразумевались отклонение от заданной координаты посева и показатели качества работы. Была подготовлена план-матрица полного факторного эксперимента. (*Результаты и обсуждение*) Проведена серия опытов на лабораторной установке и по их результатам планировалось полевое исследование с применением сеялки СН-16 с модернизированным бункером. Качество операции оценивалось по глубине посева культур, отклонению от средней линии и количеству растений на единицу площади. Эти показатели различались на разных участках экспериментального поля. Качество посева в основном соответствовало установленным требованиям. Отклонение средней глубины от заданной для зерновых не превышало 15 процентов, а для мелкосеменных культур в большинстве случаев отклонение составило 5 процентов. Отклонение от заданной глубины объясняется прежде всего различным рельефом опытных делянок. Полевая всхожесть определялась как доля взойшедших растений от числа высеванных семян и составила 90 процентов. (*Выводы*) Использование сеялки СН-16 с модернизированным бункером под мозаичный посев является перспективным. Качество возделывания исследуемых культур можно считать удовлетворительным.

**Ключевые слова:** кормовые культуры, сеялка, модернизированный бункер, качество посева, глубина посева, всхожесть семян.

■ **Для цитирования:** Фирсов А.С., Сизов И.В., Пак Л.Н. Лабораторно-полевые исследования высевальной системы при мозаичном посеве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №2. С. 72-77. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-72-77. EDN: HEHDGH.

Scientific article

## Laboratory and Field Studies of the Sowing System for Mosaic Sowing

**Anton S. Firsov,**

Ph.D.(Eng.), associate professor,

e-mail: sevenrom777@yandex.ru;

**Ivan V. Sizov,**

Ph.D.(Eng.), associate professor,

e-mail: ivan.sizov.1976@mail.ru;

**Larisa N. Pak,**

Ph.D.(Eng.), associate professor,

e-mail: pak\_lar@bk.ru

Tver State Agricultural Academy, Tver, Russian Federation

**Abstract.** The paper highlights the importance of improving arable land productivity. The production of a balanced forage mass is influenced by crop selection, sowing methods, and seed placement precision. (*Research purpose*) The study aims to identify key factors and assess their impact on the structural parameters and operating modes of the seeding mechanism. (*Materials and methods*) Mosaic sowing was performed using an SN-16 seeder equipped with a modified hopper. The experimental design

considered belt speed, crop type, and hopper shape as significant factors. Response variables included deviations from the target sowing coordinates and the performance indicators of the seeding mechanism. A full factorial experimental design matrix was developed to evaluate the effects of these factors. (*Results and discussion*) A series of trials was conducted using a laboratory setup, followed by planned field testing of the SN-16 seeder equipped with the modified hopper. Sowing quality was evaluated based on seed placement depth, deviation from the centerline, and plant density per unit area. These indicators varied across different sections of the test field, but overall, the sowing quality met the established agronomic standards. For grain crops, the deviation of the average seeding depth from the target value did not exceed 15 percent, while for small-seeded crops, it remained within 5 percent in most cases. Depth variation was primarily attributed to uneven terrain across the test plots. Field germination, defined as the proportion of emerged plants to the number of seeds sown, reached 90 percent. (*Conclusions*) The use of the SN-16 seeder equipped with a modified hopper for mosaic sowing demonstrates promising potential. The cultivation quality of the tested crops was found to be satisfactory according to key agronomic indicators.

**Keywords:** forage crops, seeder, modified hopper, sowing quality, seed placement depth, seed germination.

■ **For citation:** Firsov A.S., Sizov I.V., Pak L.N. Laboratory and field studies of the sowing system for mosaic sowing. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N2. 72-77 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-72-77. EDN: HEHDGH.

Наряду с ростом животноводства повышается актуальность задачи по увеличению продуктивности полевых кормовых угодий [1, 2]. Получение сбалансированной кормовой массы зависит от выбора сельскохозяйственной культуры и в значительной степени от способа посева. Мозаичный посев многолетних трав имеет ряд преимуществ перед обычными и схемами [3, 4]. В частности, в первый год снижается угнетение одного вида другим, в результате создаются «пятна» отдельных или двух-трех видов растений. Влияние растений разных видов друг на друга уменьшается, поэтому продуктивность травостоев несколько выше, чем при разбросно-рядовом способе.

Для определения основных факторов исследовался процесс при мозаичном посеве [5-9].

На начальном этапе изучалась технологическая операция посева мелкосеменных культур с целью определения основных факторов, влияющих на величину отклика.

**Цель исследования** – выявить степень влияния факторов на конструктивные параметры и режимы работы испытываемого высевального аппарата.

**Материалы и методы.** При планировании эксперимента в качестве значимых факторов, оказывающих наибольшее влияние при проведении процесса высева, рассматривались:

- скорость движения ленты –  $X_1$  (А), м/с;

- вид посевной культуры (геометрические параметры) –  $X_2$  (Б), мм;

- форма бункера (угол наклона) высевального устройства –  $X_3$  (В) [10, 11].

Под откликом подразумевалось отклонение от заданной координаты и качество проведения технологического процесса посева.

Лабораторное исследование при использовании сеялки СН-16 с модернизированным бункером планировали с помощью классического метода полного факторного эксперимента ПФЭ<sup>3</sup> и на основании существующих методик [12, 13]. Исследования проводятся при одновременном варьировании всех переменных, их уровни принимаются по специальным расчетам, число опытов сводится к минимуму, а после каждой серии опытов имеется возможность принимать обоснованные решения (*табл. 1*).

По результатам опытов уравнение регрессии имело вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3,$$

где  $x_1, x_2, x_3$  – кодированное значение факторов;  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13}, b_{23}$  – коэффициенты при соответствующих значениях  $x$ .

Адекватность уравнения подтверждали [14] по критерию Фишера, значимость коэффициентов уравнения определяли по критерию Стьюдента (при уровне значимости 5%).

Таблица 1

Table 1

**План-матрица лабораторного эксперимента типа ПФЭ<sup>3</sup>**  
**PLAN-MATRIX OF A 3-LEVEL FULL FACTORIAL LABORATORY EXPERIMENT**

| Фактор (код)    | Уровень натуральных значений |         |              | Кодовое значение |         |              |
|-----------------|------------------------------|---------|--------------|------------------|---------|--------------|
|                 | минимальный                  | средний | максимальный | минимальное      | среднее | максимальное |
| $X_1$ (А), м/с  | 2,3                          | 2,5     | 2,7          | –1               | 0       | +1           |
| $X_2$ (Б), мм   | 6                            | 8       | 10           | –1               | 0       | +1           |
| $X_3$ (В), град | 45                           | 60      | 90           | –1               | 0       | +1           |

Серия опытов проводилась на кафедре технологических и транспортных машин и комплексов с использованием лабораторной установки (рис. 1).

Привод осуществляется электродвигателем через ременную передачу. Бункер с посевным материалом разделен перегородками на отсеки для двух культур. Катущечные высевающие аппараты расположены непосредственно над днищем бункера с дозированием проходящих через него семян.



Рис. 1. Лабораторная установка для определения качества работы высевающих аппаратов

Fig. 1. Laboratory setup used to evaluate the performance of the seeding mechanism

Бункер и высевающие аппараты неподвижно закреплены на сваренном равнополочном уголке, расположенном над транспортной лентой. Через семяпроводы высеваемый материал поступает к

поверхности ленточного транспортера, движущегося с заданной линейной скоростью. Семена распределяются на поверхности ленты и фиксируются с помощью консистентного материала. Через определенный интервал времени установка прекращает работать, исследователь снимает данные отклика. Полученные данные обрабатываются статистически, составляются регрессионные уравнения,

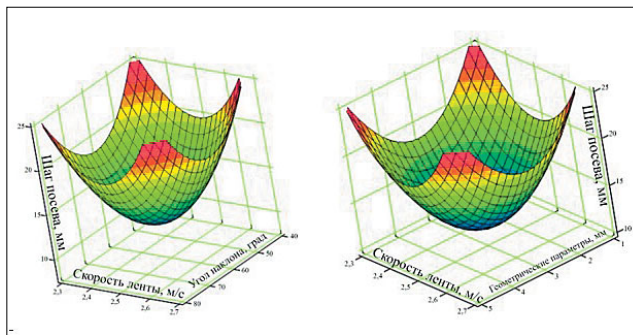


Рис. 2. Зависимость шага посева от скорости движения ленты, угла наклона бункера и геометрических параметров культур

Fig. 2. Surface plot illustrating the influence of belt speed and hopper inclination angle on seed spacing

строятся трехмерные графики зависимостей при последовательном фиксировании одного из факторов и выбираются рациональные значения факторов, что позволит добиться качественного посева (рис. 2).

В результате анализа полученной поверхности отклика от исследуемых параметров определена оптимальная область значений исследуемых факторов. Оптимальный шаг посева, составляющий 11–15 мм, наблюдается при угле наклона бункера  $\alpha = 65$  град и скорости движения ленты 2,5 м/с.

| Таблица 2                                                                                                                                    |                           |           |                |                 | Table 2                        |           |                |                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------|----------------|-----------------|--------------------------------|-----------|----------------|-----------------|
| ГЛУБИНА ЗАДЕЛКИ СЕМЯН И ОТКЛОНЕНИЯ ОТ СРЕДНЕЙ ЛИНИИ (МОЗАИЧНЫЙ ПОСЕВ)<br>SEED PLACEMENT DEPTH AND DEVIATION FROM THE MIDLINE (MOSAIC SOWING) |                           |           |                |                 |                                |           |                |                 |
| Делянка                                                                                                                                      | Рядки растений (культура) |           |                |                 | Рядки растений (культура)      |           |                |                 |
|                                                                                                                                              | 1<br>овес                 | 2<br>вика | 3<br>козлятник | 4<br>тимофеевка | 1<br>овес                      | 2<br>вика | 3<br>козлятник | 4<br>тимофеевка |
|                                                                                                                                              | Глубина заделки семян, см |           |                |                 | Отклонение от прямой линии, см |           |                |                 |
| 1                                                                                                                                            | 3,2                       | 2,5       | 2,5            | 1,5             | 3                              | 1,5       | 2,5            | 2,0             |
| 2                                                                                                                                            | 4                         | 2,0       | 3,0            | 2,0             | 2,5                            | 1         | 2,0            | 1,5             |
| 3                                                                                                                                            | 2,8                       | 3         | 1,5            | 3,5             | 2,0                            | 1,5       | 3,0            | 1,5             |
| 4                                                                                                                                            | 2,5                       | 3         | 3              | 2               | 1,5                            | 0         | 0              | 1               |
| 5                                                                                                                                            | 3                         | 2,5       | 2,5            | 3,5             | 1                              | 0         | 0              | 2,5             |
| 6                                                                                                                                            | 3,2                       | 3         | 3              | 3,5             | 1                              | 0,5       | 2              | 1               |
| 7                                                                                                                                            | 3,5                       | 2,5       | 2,5            | 3               | 1,5                            | 1         | 1,5            | 1               |
| 8                                                                                                                                            | 4                         | 4         | 3              | 3               | 0                              | 1,5       | 1,5            | 0               |
| 9                                                                                                                                            | 3,5                       | 3         | 3,1            | 3,5             | 0                              | 0         | 1              | 0               |
| 10                                                                                                                                           | 3,1                       | 3         | 3,2            | 4               | 0,5                            | 0         | 1              | 1,5             |
| Среднее                                                                                                                                      | 3,3                       | 2,9       | 2,8            | 3               | 1,3                            | 0,7       | 1,5            | 1,2             |

**Результаты и обсуждение.** В условиях лабораторного эксперимента установлены рациональные значения параметров и режимов работы высевашего аппарата СН-16 с модернизированным бункером для посева кормовых культур (овес, вика, козлятник, тимофеевка). Основной целью трехфакторного полевого эксперимента является получение массива данных для обширного исследования технологического процесса посева (Алдошин Н.В., Васильев А.С., Тюлин В.А. и др. Инновационные технологии заготовки высококачественных кормов. М.: Росинформагротех, 2020. С. 92-95). При планировании эксперимента составлена план-матрица с кодированием изучаемых факторов.

По данным эксперимента составлены уравнения регрессии второго порядка с оценкой каждого уравнения по критериям Кохрена, Фишера и Стьюдента. С учетом значимости коэффициентов регрессии проводится проверка воспроизводимости опыта и адекватности модели.

На основании лабораторного эксперимента было спланировано полевое исследование с использованием сеялки СН-16 с модернизированным бункером. Перед началом полевого опыта была проведена соответствующая предпосевная обработка почвы. Семена распределялись по схеме: тимофеевка, козлятник, вика, овес (слева направо по ходу движения сеялки) [15, 16].

Норма высева семян в каждой деланке соответствовала рекомендуемой, так как была в 2 раза занижена от норматива. Глубина хода сошников установлена на 3 см. Для оценки качества определялись глубина посева [17], отклонение от средней линии и количество растений на единицу площади [18] примерно через две недели после посева (таблицы 2, 3).

Полученные данные позволили установить, что качество посева в основном соответствовало требованиям. Отклонение средней глубины от заданной для зерновых (овес) не превышало 15%. Для мелкосеменных культур (вика, тимофеевка, козлятник) отклонение в большинстве случаев составило  $\pm 5\%$ . Отклонение от заданной глубины при посеве

| Таблица 3 |  | Table 3                                                    |  |
|-----------|--|------------------------------------------------------------|--|
|           |  | ПОЛЕВАЯ ВСХОЖЕСТЬ СЕМЯН<br>FIELD GERMINATION RATE OF SEEDS |  |
| Делянка   |  | Количество растений, шт/0,25м <sup>2</sup>                 |  |
| 1         |  | 115                                                        |  |
| 2         |  | 146                                                        |  |
| 3         |  | 108                                                        |  |
| 4         |  | 151                                                        |  |
| 5         |  | 139                                                        |  |
| 6         |  | 132                                                        |  |
| 7         |  | 124                                                        |  |
| 8         |  | 143                                                        |  |
| 9         |  | 139                                                        |  |
| 10        |  | 119                                                        |  |
| Среднее   |  | 135                                                        |  |

объясняется прежде всего различным рельефом участков поля [19], некоторой неточностью настройки или техническим состоянием рабочих органов [20].

Отклонение от прямой линии во всех случаях было менее 10 см, что соответствовало требованиям к качеству посева. Полевая всхожесть, составила 90% взшедших растений от числа высеванных семян.

### Выводы

По итогам полевого опыта можно сказать, что использование сеялки СН-16 с модернизированным под мозаичный посев бункером перспективно. При этом качество возделывания исследуемых культур удовлетворительное.

Отклонение средней глубины от заданной для зерновых (овес) не более 15%; отклонение от прямой линии во всех случаях менее 10 см, что соответствовало требованиям к качеству посева. Полевая всхожесть составила 90%.

При проходах сеялки создавалась сложная структура травостоя и в одной деланке получалось фактически четыре субделянки. Был получен мозаичный травостой из 12 двухкомпонентных и 4 однокомпонентных субделянок.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пак Л.Н., Иванов Д.А., Рублюк М.В. Многолетние травы семейства Бобовые (*Fabaceae* L.) – как основная база развития кормопроизводства Нечерноземья (обзор) // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2024. Т. 25. N5. С. 754-769. DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.5.754-769.
2. Пак Л.Н., Иванов Д.А., Сизов И.В. Тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L.) как представитель многолетних злаковых трав в развитии животноводства (обзор) // *Достижения науки и техники АПК*. 2024. Т. 38. N8. С. 13-19. DOI: 10.53859/02352451\_2024\_38\_8\_13.
3. Рублюк М.В., Иванов Д.А., Пак Л.Н. Мониторинг плодородия дерново-подзолистой почвы при возделывании многолетних трав в осушаемом агроландшафте // *Плодородие*. 2024. N4(139). С. 42-45. DOI: 10.25680/S19948603.2024.139.09.
4. Ларин Д.В., Голубев В.В. Принципы и особенности оценки земель сельскохозяйственного назначения // *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2025. N1(403). С. 27-30. DOI: 10.55186/25876740\_2025\_68\_1\_27.
5. Фирсов А.С., Белякова Е.С. Результаты трехфакторного эксперимента комбинированного сошника для разноуровневого посева семян мелкосеменных культур

- тур и внесения минеральных удобрений // *Вестник РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева*. 2021. N1(49). С. 183-190. DOI: 10.36508/RSATU.2021.49.1.027.
6. Фирсов А.С., Белякова Е.С., Беляков А.И. и др. Результаты полевого эксперимента комбинированного сошника // *Вестник НГИЭИ*. 2021. N6 (121). С. 15-25. DOI: 10.24412/2227-9407-2021-6-15-25.
  7. Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С., Миронова А.В. Разработка и исследование дозирующей системы высевашего устройства пневматической сеялки // *Техника и оборудование для села*. 2021. N6(288). С. 8-11. DOI: 10.33267/2072-9642-2021-6-8-11.
  8. Фирсов А.С., Голубев В. В. Результаты исследования параметров и режимов работы дискового пневматического высевашего аппарата для льна // *Агротехника и энергообеспечение*. 2016. N3(12). С. 41-45. EDN: WZZEXZ.
  9. Фирсов А.С., Голубев В.В. Расчет параметров высевашего диска пневматического высевашего аппарата // *Агротехника и энергообеспечение*. 2016. N4-1(13). С. 50-54. EDN: YHSPYL.
  10. Алдошин Н.В., Васильев А.С., Голубев В.В. Результаты лабораторных исследований комбинированного сошника для посева кормовых культур // *Известия сельскохозяйственной науки Тавриды*. 2020. N23. С. 111-122. EDN: UVJEQL.
  11. Aldoshin N.V., Vasiliev A.S., Kudryavtsev A.V. et al. Improvement of forage lands in central non-black earth zone of Russia by using some integrated approaches. *Plant Science Today*. 2021. Vol. 8. N1. 9-15. DOI: 10.14719/pst.2021.8.1.827.
  12. Голубев В.В., Кудрявцев А.В., Фирсов А.С., Сафонов М.А. Методика проведения агротехнического полевого опыта // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N4. С. 43-48. DOI: 10.22314/207375992017.4.4348.
  13. Голубев В.В., Фирсов А.С. Обоснование последовательности технологических операций при посеве льна-долгунца // *Вестник НГИЭИ*. 2015. N2. С. 24-28. EDN: TNPQWT.
  14. Голубев В.В., Никифоров М.В., Фирсов А.С. и др. Модификация сеялки для посева мелкосеменных культур // *Аграрный научный журнал*. 2019. N6. С. 79-81. DOI: 10.28983/asjy2019i6pp79-81.
  15. Черненко Я.В., Туманов И.В., Столяров С.А., Фирсов А.С. Разработка сеялки для возделывания мелкосеменных культур // *Аграрные конференции*. 2018. N1(7). С. 11-16. EDN: NUSSZF.
  16. Сизов И.В., Пак Л.Н., Белякова Е.С. Оценка качества тресты при раздельной технологии уборки льна-долгунца // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N2. С. 49-54. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-49-54.
  17. Сизов И.В., Блинов Ф.Л., Морозов П.В. Использование комбинированных рабочих органов и агрегатов при возделывании льна-долгунца // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2021. Т. 15. N3. С. 35-40. DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-3-35-40.
  18. Ростовцев Р.А., Черников В.Г., Ушаповский И.В., Попов Р.А. Основные проблемы научного обеспечения льноводства // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N3. С. 45-52. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52.
  19. Ценч Ю.С., Несмиян А.Ю., Хомутова Н.С. история развития конструкции высеваших аппаратов зерновых сеялок // *Вопросы истории естествознания и техники*. 2020. Т. 41. N1. С. 102-107. DOI: 10.31857/S020596060008429-3.
  20. Цуркан И.В., Кудласевич Р.А., Голубев В.В. Апробация инновационного шнекового высевашего аппарата на селекционных посевах // *Сельский механизатор*. 2023. N7. С. 6-7. DOI: 10.47336/0131-7393-2023-7-6-7.

## REFERENCES

1. Pak L.N., Ivanov D.A., Rublyuk M.V. Perennial grasses of the legume family (*Fabaceae* L.) – as the main basis for the development of fodder production in the Non-Black Earth Region (review). *Agricultural Science Euro-North-East*. 2024. 25(5). 754–769 (In Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.5.754-769.
2. Pak L.N., Ivanov D.A., Sizov I.V. Meadow timothy (*Phleum pratense* L.) as a representative of perennial grasses in the development of animal husbandry (review). *Achievements of Science and Technology of AIC*. 2024. Т. 38. N8. 13-19 (In Russian). DOI: 10.53859/02352451\_2024\_38\_8\_13.
3. Rublyuk M.V., Ivanov D.A., Pak L.N. Monitoring the fertility of soddy-podzolic soil during the cultivation of single-species and mixed crops of perennial grasses in a drained agricultural landscape. *Plodородie*. 2024. N4(139). 42-45 (In Russian). DOI: 10.25680/S19948603.2024.139.09.
4. Larin D.V., Golubev V.V. Principles and features of agricultural land valuation. *International Agricultural Journal*. 2025. N1(403). 27-30 (In Russian). DOI: 10.55186/25876740\_2025\_68\_1\_27.
5. Firsov A.S., Belyakova E.S. The results of a three-factor experiment of a combined cutter for various level sowing of small seed crops and the application of mineral fertilizers. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University*. 2021. N1(49). 183-190 (In Russian). DOI: 10.36508/RSATU.2021.49.1.027.
6. Firsov A.S., Belyakova E.S., Belyakov A.I. et al. Combined dynamics of copy system of combined cowler. *Bulletin NGIEI*. 2021. N6 (121). 15–25 (In Russian). DOI: 10.24412/2227-9407-2021-6-15-25.
7. Akhalaia B.Kh., Tsench Yu.S., Mironova A.V. Development and Research of a Pneumatic Seed Drill Seedmetering Unit. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021. N6(288). 11-13 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2021-6-8-11.
8. Firsov A.S., Golubev V.V. The results of the study of pa-

- rameters and modes of operation of disk pneumatic sowing machine for flax. *Agrotekhnika i energoobespechenie*. 2016. N3(12). 41-45 (In Russian). EDN: WZZEXZ.
9. Firsov A.S., Golubev V. Calculation of parameters of a pneumatic seed disc of the seed distributor. *Agrotekhnika i energoobespechenie*. 2016. N4-1(13). 50-54 (In Russian). EDN: YHSPYL.
  10. Aldoshin N.V., A.S. Vasiliev, Golubev V.V. Results of laboratory studies of the combined coulter for sowing forage crops. *Transactions of Taurida Agricultural Science*. 2020. N23. 111-122 (In Russian). EDN: UVJEQL.
  11. Aldoshin N.V., Vasiliev A.S., Kudryavtsev A.V. et al. Improvement of forage lands in central non-black earth zone of Russia by using some integrated approaches. *Plant Science Today*. 2021. Vol. 8. N1: 9-15 (In English). DOI: 10.14719/pst.2021.8.1.827.
  12. Golubev V.V., Kudryavtsev A.V., Firsov A.S., Safonov M.A. Technique of agrotechnical field experiment. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017. N4. 43-48 (In Russian). DOI: 10.22314/207375992017.4.4348.
  13. Golubev V.V., Firsov A.S. Rationale processing sequence at sowing flax. *Bulletin NGIEI*. 2015. N2. 24-28 (In Russian). EDN: TNPQWT.
  14. Golubev V.V., Nikiforov M.V., Firsov A.S. et al. Modification of the planter for sowing small-seeded crops. *Agrarian Scientific Journal*. 2019. N6. 79-81 (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2019i6pp79-81.
  15. Chernenko Ya.V., Tumanov I.V., Stolyarov S.A., Firsov A.S. Development of a seeder for cultivating small-seeded crops. *Agrarian Conferences*. 2018. N1(7). 11-16 (In Russian). EDN: NUSSZF.
  16. Sizov I.V., Pak L.N., Belyakova E.S. Evaluation of straw flax preparation quality in the framework of separate flax harvesting. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N2. 49-54 (In Russian). DOI:10.22314/2073-7599-2023-17-2-49-54.
  17. Sizov I.V., Blinov F.L., Morozov P.V. The use of combined working bodies and units for fiber flax cultivation. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2021. T. 15. N3. 35-40 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2021-15-3-35-40.
  18. Rostovtcev R.A., Chernikov V.G., Ushchapovsky I.V., Popov R.A. The main problems of scientific support of flax growing. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. T. 14. N3. 45-52 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52.
  19. Tsench Yu., Nesmiyan A., Khomutova N. The History of development of seed-feeding devices on grain drills. *Studies in the History of Science and Technology*. 2020. Vol. 41. N1. 102-107 (In Russian). DOI: 10.31857/S020596060008429-3.
  20. Tsurkan I.V., Kudlasevich R.A., Golubev V.V. Approbation of an innovative auger sowing device on breeding crops. *Sel'skij mekhanizator*. 2023. N7. 6-7 (In Russian). DOI: 10.47336/0131-7393-2023-7-6-7.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Заявленный вклад соавторов:

Фирсов А.С. – научное руководство, формулирование направления исследований, разработка методики исследований, литературный анализ и визуализация;

Сизов И.В. – разработка методики исследований;

Пак Л.Н. – анализ технологий.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Coauthors' contribution:

Firsov A.S. – scientific supervision, formulation of the research direction, development of the research methodology, literature analysis, and data visualization;

Sizov I.V. – development of the research methodology;

Pak L.N. – analysis of the technological framework.

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

03.04.2025

26.05.2025

EDN: HQHGAN

DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-78-83



Научная статья

УДК 631.358



## Автоматизированная почвообрабатывающая машина для послойной обработки почвы высокотурбулентной воздушной струей

**Бадри Хутаевич Ахалая,**  
кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
e-mail: badri53@yandex.ru;

**Юлия Сергеевна Ценч,**  
доктор технических наук, член-корреспондент РАН,  
главный научный сотрудник,  
e-mail: vimasp@mail.ru;  
**Наталья Ивановна Беляева,**  
младший научный сотрудник  
e-mail: \_catlin@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

**Реферат.** Показали, что сохранение и повышение плодородия почв сельскохозяйственных угодий остается одной из важнейших народнохозяйственных проблем. В почвозащитной системе земледелия безотвальная обработка почвы играет определяющую роль в предупреждении развития ветровой и водной эрозии, в процессах регулирования ее физических, химических и биологических свойств, способствует более полному использованию почвенных и климатических ресурсов для получения более высоких и устойчивых урожаев сельскохозяйственных культур. *(Цель исследования)* Разработка автоматизированной почвообрабатывающей машины для послойной обработки высокотурбулентной воздушной струей, повышающей плодородие почвы и снижающей тяговое сопротивление агрегата. *(Материалы и методы)* Разработана конструкция автоматизированной почвообрабатывающей машины для послойной обработки почвы высокотурбулентной воздушной струей, при которой по команде системы управления срабатывают пневмоэлектродвигатели и подается сжатый воздух в рабочие органы. Конструкция машины содержит: игольчатые прикапывающие катки с длиной иглы до 10 см, дисковые фрезы с глубиной обработки под корнеплоды – 15-20 и под зерновые – 8-12 сантиметров. Рабочие органы выполнены в виде двух дугообразных ножей и установлены друг за другом с интервалом 15-20 см, при этом передний нож установлен на глубину обработки 10-12, задний на 10-12 сантиметров ниже, *(Результаты и обсуждение)* Установили, что рассматриваемая конструкция автоматизированной почвообрабатывающей машины позволит импульсными ударами сжатого воздуха, без разрушения структуры почвы, увеличить производительность и обеспечить возможность проводить как сплошную обработку, так и рядовую с улучшением качественных показателей, сократив расход горючего. *(Выводы)* Разработка конструкции автоматизированной почвообрабатывающей машины для послойной обработки высокотурбулентной воздушной струей создает возможность для сохранения и повышения плодородия почвы.

**Ключевые слова:** почвообрабатывающая машина, секция, баллон сжатого воздуха, пневмотрубки, клапаны пуска, рабочий орган, зубовая борона.

■ **Для цитирования:** Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С., Беляева Н.И. Автоматизированная почвообрабатывающая машина для послойной обработки почвы высокотурбулентной воздушной струей // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №2. С. 78-83. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-78-83. EDN: HQHGAN.

Scientific article

## Automated Layer-by-Layer Soil Tillage Machine Using a Highly Turbulent Air Jet

**Badri Kh. Akhalaya,**  
Ph.D.(Eng.), leading researcher,  
e-mail: badri53@yandex.ru;

**Yulia S. Tsench,**  
Dr.Sc.(Eng.), corresponding member of the RAS,  
chief researcher, e-mail: vimasp@mail.ru;  
**Natalia I. Belyaeva,**  
junior researcher,  
e-mail: \_catlin\_@mail.ru,

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The paper highlights that preserving and enhancing the soil fertility of agricultural lands remains one of the most pressing challenges for the national economy. In soil conservation farming systems, no-till soil cultivation plays a crucial role in preventing wind and water erosion, regulating the soil's physical, chemical, and biological properties, and optimizing the use of soil and climatic resources to ensure higher and more stable crop yields. (*Research purpose*) To develop an automated layer-by-layer soil tillage machine that utilizes a highly turbulent air jet to improve soil fertility and reduce the traction resistance of the machine-tractor unit. (*Materials and methods*) A design was developed for an automated layer-by-layer soil tillage machine utilizing a highly turbulent air jet. Upon receiving a signal from the control system, pneumatic solenoid valves are activated supplying compressed air to the working tools. The machine is equipped with needle rollers having needles up to 10 centimeters long and disc mills capable of reaching tillage depths of 15–20 centimeters for root crops and 8–12 centimeters for grain crops. The working tools include two arc-shaped blades arranged in sequence with a spacing of 15–20 centimeters; the front blade operates at a depth of 10–12 centimeters, while the rear blade is positioned 10–12 centimeters lower to enable multi-layer soil tillage. (*Results and discussion*) The results demonstrate that the proposed design delivers impulse bursts of compressed air that loosens the soil without disturbing its structure. This improves operational efficiency and supports both continuous and row-specific tillage. Moreover, the system enhances quality indicators and reduces fuel consumption. (*Conclusions*) The development of an automated layer-by-layer soil tillage machine utilizing a highly turbulent air jet offers a promising solution for preserving and improving soil fertility.

**Keywords:** soil tillage machine, section, compressed air tank, pneumatic tubes, start valves, working tool, tooth harrow.

■ **For citation:** Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S., Belyaeva N.I. Automated layer-by-layer soil tillage machine using a highly turbulent air jet. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N2. 78–83 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-78-83. EDN: HQHGAH.

Качественная обработка почвы является необходимым условием реализации потенциала возделываемых сельскохозяйственных культур. Механическое воздействие рабочими органами машин и орудий на почву формирует в ней условия, благоприятные для посева и развития растений, накопления и сохранения влаги, предотвращения эрозии [1]. При разных почвенных условиях послойную обработку за один проход могут выполнить только комбинированные почвообрабатывающие машины [2].

Нетрадиционный метод обработки почвы импульсами высокого давления сжатого воздуха при воздействии на почву способен улучшить плодородие почвы, т.е. ее свойства и качество, а тем самым усилить рост и развитие растений [3, 4].

Использование перспективной технологии обработки почвы с помощью импульсов сжатого воздуха позволяет сочетать его с оборотом пласта при соблюдении между ними большого временного интервала [5]. Положительный эффект сохранения и повышения плодородия почвы достигается, если проводить обработку почвы с оборотом пласта в четыре-пять лет один раз, в зависимости от необходимости [6, 7].

Перед разработкой конструкции комбинированного агрегата прецизионной обработки воздействием сжатого воздуха на почву был проведен патентный анализ почвообрабатывающих машин и устройств с различными принципами действия (RU2335107, 2008; SU1664128; RU2335107, 2008; РФ 2491807, 2012; RU136275, 2013; RU136674, 2014) [8, 9]. Подавляющее большинство работ посвящены тра-

диционным способам обработки почвы. Эти устройства связаны с технологиями, в которых в разной степени происходит механическое воздействие на почву, что могло бы послужить примером поиска аналогов [10].

Приоритетным выбором по верному направлению был почвообрабатывающий агрегат, принцип действия которого основан на использовании воздушного потока высокого давления, действующего в почве проведенной щели рабочим органом в виде щелевателя [11]. Принципиальным недостатком работы агрегата послужила конструктивная особенность. Она заключается в высоком тяговом сопротивлении агрегата, создаваемом вертикально к горизонтальной поверхности установленным щелевателем, по этой причине в низкой рабочей скорости и производительности устройства [12].

Для получения высоких урожаев необходимо развивать новые технологии обработки почвы. Для этой цели в ФНАЦ ВИМ ведутся исследования различных способов воздействия рабочих органов на почву, предложены технологии и технические средства для обработки почвы импульсными ударами сжатого воздуха. На разработанную конструкцию автоматизированной почвообрабатывающей машины для послойной обработки почвы высокотурбулентной воздушной струей получен патент RU 2740583, 2021 г. [13].

**Цель исследования:** разработка автоматизированной почвообрабатывающей машины для послойной обработки высокотурбулентной воздушной струей, повышающей плодородие почвы и снижающей тяговое сопротивление агрегата.

**МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Выполнен анализ агроприемов обработки залежных земель и восстановления плодородия при вовлечении их в сельскохозяйственный оборот и разработаны исходные требования на базовую машинную технологическую операцию ресурсосберегающей основной обработки таких почв.

Многочисленные исследования и практический опыт передовых хозяйств убедительно показывают, что наиболее агротехническим эффективным и значительно менее затратным путем решения задачи сохранения и повышения плодородия почвы является использование перспективного способа обработки почвы с применением импульсов сжатого воздуха [14].

Технология внутривспашечной обработки предусматривает рыхление пульсирующими ударами сжатого воздуха на установочную глубину обработки рядами. Соотношение скорости агрегата, частоты импульсов, радиуса действия импульса и глубины обработки почвы определены условием 3:4:5:10.

Экспериментально установлено, что, к примеру, если скорость агрегата  $V = 6$  км/ч, то при обработке почвы на глубину 20 см с радиусом действия импульса 10 см, частота импульса составит  $n = 8$  Гц. При этом, для сплошной обработки почвы линии соседних импульсных рядов должны размещаться на расстоянии 20 см [15].

К примеру, если обрабатывать почву под кукурузу с междурядьем 70 см сжатым воздухом с радиусом действия 10 см, то необработанная полоса в междурядье составит:  $70 - (10 + 10) = 50$  см.

Технология обработки импульсными ударами сжатого воздуха позволяет без разрушения структуры почвы увеличить производительность и обеспечивает возможность проводить как сплошную обработку, так и рядовую с улучшением качественных показателей, сократить расход горючего. В каждой конкретной почве наблюдается специфическая зависимость напряжений и деформаций [16].

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Перед разработкой агрегата с импульсными ударами сжатого воздуха был проведен поиск по выявлению близкого технического решения. В ФНАЦ ВИМ ведутся разработки конструкций почвообрабатывающих агрегатов различной модификации и комплектации рабочих органов по назначению и принципу действия. На разработки получены патенты на изобретение (RU2679735, 2019; RU2679736, 2019; RU2702863, 2019; RU2701 813, 2019; RU2745458, 2021).

Автоматизированная почвообрабатывающая машина для послойной обработки высокотурбулентной воздушной струей (рисунк), состоит из двух боковых секций 1, 2 и одной центральной секции 3, изготовленной со сницей 4, опорными 5 и транспортными 6 колесами и баллоном 7 сжатого воздуха.

Передняя рама всех секций изготовлена с полым валом 8, которые связаны с баллоном сжатого воздуха 7, системой пуска сжатого воздуха 9, полых ступиц 10 с установленными на них рабочими органами 11 овальной формы с клапанами 12, позади установлены дисковые фрезы 13 и катки 14.

Рабочие органы 11 изготовлены с заточкой режущей части и размещены между собой на расстоянии 15-20 см. Передний рабочий орган закреплен на раме с рабочей глубиной 10-12 см, а следующий за ним – на столько же ниже. С трех сторон рабочих органов на высоте 5 см от их носка размещены три выпускных клапана 12. Из отверстия передних частей рабочих органов сжатый воздух подается параллельно горизонтальной поверхности, а боковые под острым углом к ней, радиус действия импульсов сжатого воздуха равен 5 см.

В состав рабочего органа входят пневмоэлектрклапаны 15, 17, микрорессиверы 16, поршень 18, цилиндры 19, 21. Винтовым механизмом 20, перекрывающим клапан, осуществляется отключение и включение от общей заправочной магистрали.

По мере открытия клапанов 15 заполняются все микрорессиверы 16 секций 1-3 (трубопроводы не показаны) сжатым воздухом высокого давления.

Таким образом, все микрорессиверы 16 приводятся в подготовленное состояние для подачи малобъемного импульса сжатого воздуха к клапанам 12 через полый вал 8. После команды системы управления начинают действовать пневмоэлектрклапаны 17, что способствует переходу сжатого воздуха большого давления из микрорессиверов в полый вал. После чего сжатый воздух поступает к клапанам 12, которые закреплены в рабочих органах 11 изнутри с выходом воздуха спереди и по бокам через ступицу 10.

После углубления овальных рабочих органов 11 в почву на разные глубины обработки клапаны 12 открываются и сжатый воздух высокого давления импульсным воздействием производит рыхление почвы. После прохода автоматизированной почвообрабатывающей машины образуется рыхлый слой, препятствующий интенсивному испарению воды из корнеобитаемого слоя. В результате улучшаются водный и воздушный режимы почвы, создаются благоприятные условия для дружных всходов, роста и развития сельскохозяйственных культур.

Ресурсосберегающие агроприемы восстановления плодородия и продуктивности земель обеспечивают сокращение энергозатрат на обработку почвы на 25-35% за счет рационального рыхления и использования естественных процессов разуплотнения почв, сохранения влаги, предотвращения эрозии при почвозащитной разноглубинной и послойно-полосной обработках. Многофункциона-

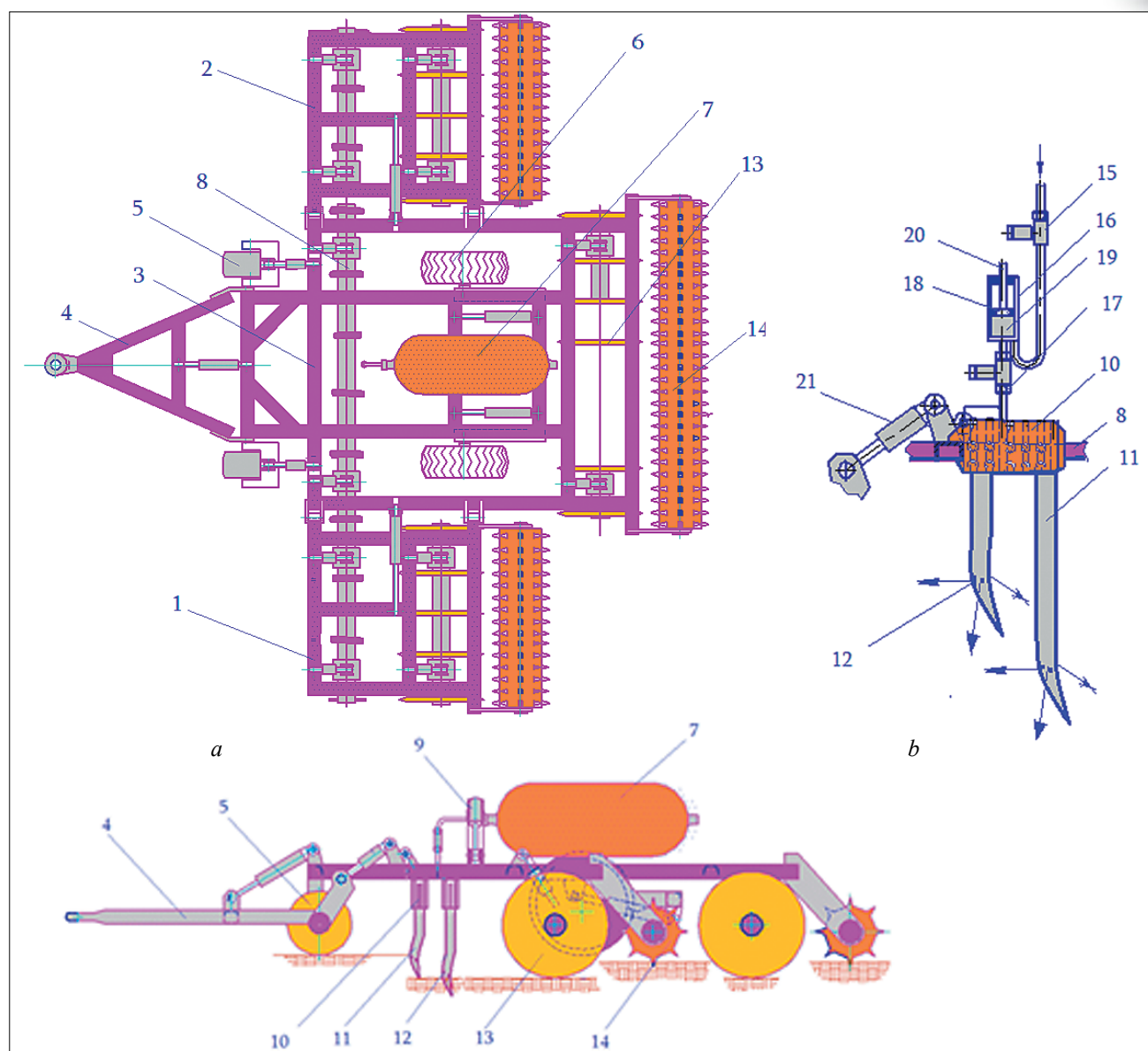


Рисунок. Автоматизированная установка для послойной обработки почвы: а – общая схема; б – рабочий орган  
Figure. Automated layer-by-layer soil cultivation machine a – general schematic; b – working tool (soil-cutting implement)

нальная автоматизированная почвообрабатывающая машина со сменными рабочими органами обеспечит сокращение в 1,5-2 раза затрат на технику.

**Выводы.** Решением поставленной задачи путем создания технических средств для обработки почвы пульсирующими ударами сжатого воздуха открывается новая возможность сохранения и повышения плодородия почвы и улучшения экологических и экономических показателей.

В результате в нижних слоях происходит обогащение почвы воздухом, содержащим до 80% свободного азота. Существенно улучшаются инфильтрационные свойства почвы. Все это в совокупности способствует реальному повышению плодородия почвы.

Внедрение всего комплекса мер альтернативной обработки почвы позволит поднять экономическую эффективность и повысить общую агротехническую культуру производства продукции растениеводства.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. Перспективные пути применения энерго- и экологически эффективных машинных технологий и технических средств // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2013. N4. С. 8-11. EDN: QZKYNV.
2. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Мазитов Н.К. Почвообрабатывающая техника: пути импортозамещения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N2. С. 37-42. DOI: 10.22314/207375992017.2.3741.

3. Дорохов А.С., Сибирев А.В., Аксенов А.Г., Мосяков М.А. Аналитическое обоснование системы автоматического контроля глубины обработки почвы // *Агроинженерия*. 2021. N(103). С. 19-23. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-3-19-23.
4. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Мазитов Н.К. Почвообрабатывающая техника: пути импортозамещения // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N2. С 37-42. DOI: 10.22314/2073-7599-2017-2-37-41.
5. Ахалая Б.Х., Старовойтов С.И., Ценч Ю.С. и др. Комбинированный агрегат с универсальным рабочим органом для поверхностной обработки почвы // *Техника и оборудование для села*. 2020. N8 (278). С. 8-11. DOI: 10.33267/2072-9642-2020-8-8-11.
6. Ахалая Б.Х. Культиватор с универсальным глубоко-рыхлителем // *Сельский механизатор*. 2016. N5. 12-13. EDN: WAIJIR.
7. Русинов А.В., Слюсаренко В.В. Влияние многократных проходов колес по одному следу на деформацию почвы // *Техника в сельском хозяйстве*. 2005. N4. С.46-51 (In Russian). EDN: UJNFQL.
8. Измайлов, А.Ю., Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С. и др. О синтезе роботизированного сельскохозяйственного агрегата // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2019. N4. С. 63-68. DOI: 10.30850/vrsn/2019/4/63-68.
9. Миронова А.В., Лискин И.В., Панов А.И. Технология восстановления целинных и залежных земель // *Технический сервис машин*. 2020. N2 (139). С. 111-121. DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-2-111-121.
10. Цепляев А.Н., Косильников Р.А., Цепляев В.А. др. Снижение тягового сопротивления сельскохозяйственных машин за счет минимализации его колебаний при обработке тяжелосуглинистых почв // *Агроинженерия*. 2019. N2 (90). С. 14-19. EDN: UTZXZN.
11. Лискин И.В., Миронова А.В. Обоснование искусственной почвенной среды для лабораторных исследований износа и тяговых характеристик почворежущих рабочих органов // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N3. С. 53-58. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-3-53-58.
12. Ахалая Б.Х. Совершенствование технологии заготовки качественных кормов // *Вестник ВНИИМЖ*. 2009. Т. 20. N2 . С. 118-122. EDN: NPUEWZ.
13. Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х., Старовойтов С.И., Ценч Ю.С. Трехсекционный почвообрабатывающий агрегат с универсальными сменными рабочими органами // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2019. Т. 14. N3(54). С. 92-95. DOI: 10.12737/article\_5db9656e2ade23.01560949.
14. Жук А.Ф., Шишиморов С.А., Юнусов Г.С., Пустотин А.М. Комбинированный агрегат АПК-6 // *Сельский механизатор*. 2017. N8. С. 18-19. EDN: ZBIXIJ.
15. Старовойтов С.И., Ценч Ю.С., Коротченя В.М., Личман Г.И. Технические системы цифрового контроля качества обработки почвы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N1 С. 16-21. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21.
16. Ахалая Б.Х., Ценч Ю.С. Комбинированный агрегат для обработки почвы импульсным воздействием ударной волны // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N4. С. 62-67. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-62-67.

## REFERENCES

1. Izmailov A.Yu., Lobachevsky Ya.P. Promising ways of applying energy and environmentally efficient machine technologies and technical means. *Agricultural Machinery and Technology*. 2013. N4. 8-11 (In Russian). EDN: QZKYNV.
2. Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Mazitov N.K. Soil-cultivating machinery: ways of import substitution. *Agricultural Machinery and Technology*. 2017. N2. 37-42 (In Russian). DOI: 10.22314/207375992017.2.3741.
3. Dorokhov A.S., Sibiryov A.V., Aksekov A.G., Mosyakov M.A. Analytical feasibility study of the automatic control system of tillage depth. *Agroengineering*. 2021. N3(103). 19-23 (In Russian). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-3-19-23.
4. Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Mazitov N.K. Soil-cultivating machinery: ways of import substitution. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2017. N2. 37-42 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2017-2-37-41.
5. Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S., Starovoitov S.I. et al. A combined unit fitted with a versatile working body for surface tillage. *Machinery and Equipment for Rural Areas*. 2020. N8 (278). 8-11 (In Russian). DOI: 10.33267/2072-9642-2020-8-8-11.
6. Akhalaya B.Kh. Cultivator with universal chisel. *Selskiy Mechanizator*. 2016. N5. 12-13 (In Russian). EDN: WAIJIR.
7. Rusinov A.V., Slyusarenko V.V. The effect of multiple wheel passes over one track on soil deformation. *Machinery in Agriculture*. 2005. No4. 46-51 (In Russian). EDN: UJNFQL.
8. Izmaylov A.Yu., Lobachevsky Ya.P., Tsench Yu.S. et al. about synthesis of robotic agriculture mobile machine. *Vestnik of the Russian Agricultural Science*. 2019. N4. 63-68 (In Russian). DOI: 10.30850/vrsn/2019/4/63-68.
9. Mironova A.V., Liskin I.V., Panov A.I. Technology for restoring virgin and fallow lands. *Machinery Technical Service*. 2020. N2 (139). 111-121 (In Russian). DOI: 10.22314/2618-8287-2020-58-2-111-121.
10. Tseplyayev A.N., Kosulnikov R.A., Tseplyayev V.A. et al. Reducing traction resistance of agricultural machines by minimalizing its fluctuations when tilling heavy-loamy soils. *Agricultural Engineering*. 2019. N2(90). 14-19 (In Russian).
11. Liskin I.V., Mironova A.V. Artificial soil environment

- justification for laboratory studies of wear and traction characteristics of soil-cutting working bodies. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N3. 53-58 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-3-53-58.
12. Ahalaya B.H. Improving the technology of harvesting high-quality feed. *Journal of VNIIMZH*. 2009. Vol. 20. N2. 118-122 (In Russian). EDN: NPUEWZ.
  13. Ahalaya B., Shogenov Yu., Starovoytov S.I., Tsench Yu.S. Three-section tillage unit with universal replaceable working bodies. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2019. Vol. 14. N3(54). 92-95 (In Russian). DOI: 10.12737/article\_5db9656e2ade23.01560949.
  14. Zhuk A.F., Shishimorov S.A., Yunusov G.S., Pustotin A.M. Combined unit APR-6. *Selskiy Mechanizator*. 2017. N8. 18-19 (In Russian). EDN: ZBIXIJ.
  15. Starovoytov S.I., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M., Lichman G.I. Technical systems for digital soil quality control. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N1. 16-21 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-1-16-21.
  16. Akhalaya B.Kh., Tsench Yu.S. Combined unit for tillage with pulsed shock wave action. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N4. 62-67 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-4-62-67.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Заявленный вклад соавторов:

Ахалая Б.Х. – разработка конструктивных схем и параметров Автоматизированной почвообрабатывающей машины для послойной обработки почвы, определение методики исследования;

Ценч Ю.С. – постановка цели исследования, критический анализ, формирование общих выводов;

Беляева Н.И. – анализ литературных данных подготовка текста

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

### Coauthors' contribution:

Akhalaya B.Kh. – developing the design schemes and parameters of an automated layer-by-layer soil tillage machine, determining the research methodology;

Tsench Yu.S. – formulating the research goal, conducting critical analysis, developing the overall conclusions;

Belyaeva N.I. – conducting the literature review and preparing the manuscript

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

03.04.2025

22.05.2025



## Малогабаритный агрегат для восстановления горных лугопастбищных земель

Сергей Игоревич Бидеев,  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
e-mail: biser0@yandex.ru;

Людмила Романовна Гулуева,  
научный сотрудник,  
e-mail: luda\_gulueva@mail.ru

Северо-Кавказский научно-исследовательский институт горного и предгорного сельского хозяйства  
Владикавказского научного центра РАН, Республика Северная Осетия–Алания, Российская Федерация

**Реферат.** Показали, что для предотвращения тенденции деградации горных лугов и пастбищ и снижения продуктивность горных кормовых угодий и их восстановления необходимо внесение минеральных удобрений. При этом выявлено отсутствие малогабаритной техники для обработки горных участков. *(Цель исследования)* Разработать малогабаритный лабораторный образец агрегата для внесения минеральных удобрений на поверхность горных склонов, где расположены естественные травостой залежных кормовых угодий. *(Материалы и методы)* Обосновали технологию и создали лабораторный образец агрегата. Техническая экспертиза и испытания агрегата и технологии проведены в горной зоне Республики Северная Осетия – Алания (Даргавская котловина). Составлено техническое задание на разработку образца агрегата. *(Результаты и обсуждение)* Предметом исследований являлись технология высева гранулированных удобрений на поверхность и в щели, нарезаемые поперек горных склонов, нормы и способ внесения удобрений с помощью малогабаритного агрегата. Разработана конструкция агрегата с маятниковыми высевающими аппаратами. Изготовлен малогабаритный лабораторный образец для поверхностного внесения минеральных удобрений. Определены функциональные показатели работы агрегата. Подтверждено, что лабораторный образец агрегата соответствует агротехническим требованиям и техническому заданию. Выявили, что при применении агрегата повышаются производительность труда и продуктивность горных кормовых угодий на 15–20 процентов. *(Выводы)* Применение малогабаритного агрегата обеспечивает снижение деградационных процессов на склоновых участках путем ускоренного восстановления качества и количества многолетних трав залежных кормовых угодий. Урожай зеленой массы на различных высотных поясах и экспозициях склонов увеличился соответственно: в лугостепном на 205,8; в субальпийском – на 95,3; альпийском – на 57,3 центнера с гектара. Признана целесообразность совершенствования и применения опытного образца на мелкоконтурных горных залежных участках с уклоном до 13 градусов.

**Ключевые слова:** горные лугопастбищные угодья, восстановление, внесение удобрений, малогабаритный агрегат, разработка блока-модуля,

■ **Для цитирования:** Бидеев С.И., Гулуева Л.Р. Малогабаритный агрегат для восстановления горных лугопастбищных земель // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2025. Т. 19. №2. С. 84-92. DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-84-92. EDN: MMHXRБ.

Scientific article

## A Small-Sized Unit for the Restoration of Mountain Grasslands

Sergei I. Bideev,  
Ph.D.(Eng.), senior researcher,  
e-mail: biser0@yandex.ru;

Lyudmila R. Gulueva,  
researcher,  
e-mail: luda\_gulueva@mail.ru

North Caucasian Research Institute of Mountain and Piedmont Agriculture – theAffiliate of Vladikavkaz Scientific  
Centre of the Russian Academy of Sciences, Republic of North Ossetia–Alania, Russian Federation

**Abstract.** The paper demonstrates that preventing the degradation of mountain meadows and pastures, mitigating the decline in the productivity of mountain grass lands, and supporting their restoration require the application of mineral fertilizers. It also highlights the lack of small-sized machinery suitable for treating mountainous areas. *(Research purpose)* The aim of this research is to develop a small-sized laboratory prototype of a unit for applying mineral fertilizers on sloped mountainous terrain covered with natural grass stands on fallow forage lands. *(Materials and methods)* The proposed technology was substantiated, and a laboratory

prototype of the unit was created. Technical evaluations and field tests of both the unit and the technology were conducted in the mountainous region of the Republic of North Ossetia–Alania (Dargavs Basin). Additionally, a technical specification was compiled to support the development of the prototype. *(Results and discussion)* The research focused on the technology for applying granular fertilizers both to the surface and into slits across mountain slopes, as well as on determining the optimal application rates and methods when using a small-sized. As a result, a unit design incorporating pendulum-type sowing mechanisms was developed, and a small-sized laboratory prototype for surface application of mineral fertilizers was produced. The functional performance indicators of the unit were established. The laboratory prototype was confirmed to meet agrotechnical requirements and comply with the technical specification. Furthermore, it was found that using the unit increases labor productivity and enhances the productivity of mountain forage lands by 15–20 percents. *(Conclusions)* The use of a small-sized unit contributes to reducing degradation processes on sloped plots by accelerating the restoration of both the quality and quantity of perennial grasses on fallow forage lands. The yield of green biomass increased across various altitudinal zones and slope exposures as follows: by 20.58 tonnes per hectare in the meadow-steppe zone, by 9.53 tonnes per hectare in the subalpine zone, and by 5.73 tonnes per hectare in the alpine zone. The feasibility of further improving and applying the prototype on small-contour mountainous fallow areas with slopes of up to 13 degrees has been confirmed.

**Keywords:** mountain meadow-pasture lands, restoration, fertilizer application, small-sized unit, block-module design.

■ **For citation:** Bideev S.I., Gulueva L.R. A small-sized unit for the restoration of mountain grass lands. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025. Vol. 19. N2. 84-92 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-2-84-92. EDN: MMHXRБ.

Удовлетворение потребности населения в животноводческой продукции связано с ростом поголовья и продуктивности животных, что требует наличия прочной кормовой базы и увеличения производства основных технологических культур. Для эффективного ведения животноводства в горной местности нужны высококачественное корма в необходимых количествах. Это условие относится к Северной Осетии, где около половины территории занимают природные кормовые угодья. Из этих площадей сенокосы занимают только 13,4%, остальные 89,6% пастбища [1].

Сравнивая горное и полевое (равнинное) кормопроизводство, надо отметить важность развития и повышения эффективности горных пастбищных земель, что позволит освободить огромные площади на равнине под выращивание полевых злаковых культур и другой продукции растениеводства. Это особенно важно для регионов, где на человека приходится 0,35–0,40 га сельскохозяйственных угодий против 0,96 га в среднем по России (Харисов М.К., А. Абдуллин М.Р., Зотов А.А. Экологичные ресурсосберегающие технологии улучшения и рационального использования природных кормовых угодий Южного Урала; тр. XXVIII межд. науч. симпоз. 2019. С. 402–413). Потенциал горных, естественных сенокосов и пастбищ очень большой, однако по продуктивности их доля не превышает 17%, что объясняется крайне неудовлетворительным мелиоративным и агроэкологическим состоянием.

Сильно пересеченный рельеф, со склонами различной крутизны определяет мелкоконтурность землепользования, как следствие, ограничение и нередко отсутствие возможности использования механизации и приемов интенсивной агротехники.

К важнейшим агротехническим мероприятиям для получения высоких урожаев на сенокосах и пастбищах относится внесение минеральных и органических удобрений. В горных почвах в достаточном для растений количестве содержится калий, но наблюдается дефицит азота (Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Экология азотфиксации. — Саратов: Амирит, 2019. 252 с.) и фосфора [2]. Частое использование травостоя в летний сезон приводит к выносу из почвы с урожаем зеленой массы питательных веществ.

Так, на 1 т продукции (сена) расходуется 17 кг азота, 7 кг фосфора и 18 кг калия (Бясов К.Х. Почвы. Природные ресурсы Республики Северная Осетия–Алания. – Владикавказ, 2000. 126 с.). По этой причине все мероприятия, направленные на повышение продуктивности горных лугов без внесения необходимых химических элементов, дадут положительный результат только через 2–3 года, после чего продуктивность пастбищ упадет до первоначального уровня.

Эффект удобрения земель в горных районах зависит от способа внесения. В современном агропроизводстве удобрения вносят разбрасывателями РТТ-4,2, РУМ-3, НРУ-0,5, 1МРГ-4 и других марок. Однако по ряду причин (громоздкость, низкая маневренность) их невозможно использовать на мелкоконтурных пастбищах, а из-за постоянно меняющейся силу и направление розы ветров удобрения разносятся. Более 30 тыс. га залежных земель на сравнительно пологих склонах в виде террас лишены необходимых удобрений, остаются эродированными, заросшими сорняками [3]. Значительно сокращаются площади для заготовки кормов на горных сельскохозяйственных землях.

Проблему необходимо решать современными методами с внедрением культур технических мероприятий и приемов. Обогащение почвы минеральными удобрениями положительно действует на продуктивность, ботанический и химический состав травостоя, выживаемость отдельных видов трав и их долголетие. Правильное использование удобрений с учетом ботанического состава и возраста травостоя, запаса доступных питательных веществ в почве и режима ее увлажнения оказывает не меньшее влияние на агрохимические и агрофизические свойства почвы [4]. Минеральные удобрения часто способствуют мобилизации почвенных запасов питательных веществ.

Одним из культур технических приемов улучшения водно-воздушного режима почвы является щелевание. Совмещение этой операции с внесением удобрений позволяет удерживать воду в бороздах, изменить видовой состав трав, значительно повысить урожайность кормовых угодий.

**Цель исследования** — разработать и изготовить малогабаритный маневренный лабораторный образец блок-модуля для поверхностного внесения минеральных удобрений на базе трактора МТЗ-82. Использование такого агрегата обеспечит восстановление залежных кормовых угодий на 20-25%, способствуя ускоренному росту многолетних трав деградированных кормовых угодий.

В задачи исследований входили обоснование технологии, оценка влияния внесения минеральных удобрений на поверхность склона и в нарезаемые щели, изменения качественного и количественного состава травостоя, возможности улучшения питания растений и обогащение кормового травостоя [5].

**Материалы и методы.** По разработанному авторами эскизному проекту в лаборатории механизации отдела горного луговодства СКНИИ ГПСХ создан образец малогабаритного приспособления для улучшения качества травостоя кормовых площадей методом поверхностного внесения удобрений. За основу новой машины принят культиватор чизельный горный (КЧГ-2,4) конструкции СКНИИ ГПСХ (Патент RU 11440 U1, 1999 г.).

Техническую экспертизу, испытания агрегата и технологии проводили на деградированном участке горной зоны РСО – Алания (Даргавская котловина, опорный пункт СКНИИ ГПСХ) на высоте 1540 м над уровнем моря, крутизна склона в местности Сугсадтанраг 13-16°. Показатели работы агрегата определены по ОСТ 10.5.1-2000 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины посевные. Методы оценки функциональных показателей», по ГОСТ 28714-2024. «Межгосударственный стандарт. Техника сельскохозяйственная. Машины для внесения твердых минеральных удобрений. Методы

испытаний» (введен 25.12.2024 N 2003-ст) корректировались нормы внесения удобрения в виде гранул.

Проведены расчеты емкости бункера для минеральных удобрений, передаточного числа механизма привода туковывсевающего аппарата, определена кинематика движения агрегата по полю согласно агротехническим требованиям (АТТ). По результатам НИОКР разработан эскизный проект и изготовлен лабораторный образец агрегата для поверхностного внесения минеральных удобрений на залежных кормовых угодьях [6, 10]. Разработаны принципиальная схема агрегата и технология поверхностного внесения минеральных удобрений на деградированные луга и пастбища [7].

Для внесения минеральных удобрений культиватор несколько переоснастили. На раму установили туковывсевающий аппарат, оставили пружинные стойки для крепления прикатывающих катков [8] в варианте основного опыта и для нарезания щелей в дополнительном опыте.

На раме 6 культиватора установлены на кронштейнах 7 два ряда рабочих органов на пружинистых двухвитковых стойках 8, за счет которых при наезде на камень можно выйти из почвы и обогнуть препятствие, что очень важно при работе на каменистой земле (рис. 1). Ширина захвата культиватора небольшая – 2,4 м, что очень удобно для работы на мелкоконтурных горных участках.

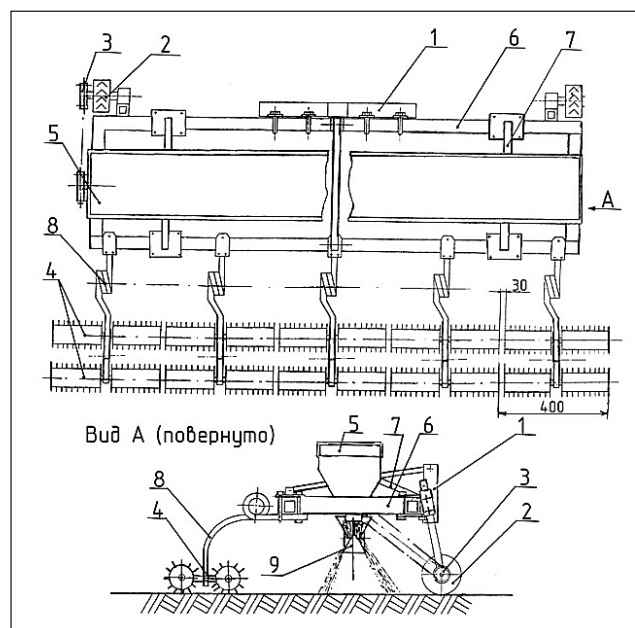


Рис. 1. Схема лабораторного образца

Fig. 1. Schematic diagram of a laboratory prototype

В состав агрегата входят автосцепка 1 с трактором МТЗ-82, опорные колеса 2 с цепной передачей 3, при помощи которых можно изменять и регулировать глубину основных рабочих органов посредством телескопических стоек и фиксаторов. Выброс

гранул минеральных удобрений (туков) из бункера 5 производится высевными аппаратами 9 в зависимости от нормы высева, которая регулируется по мере необходимости. Катки 4 сразу прижимают гранулы к почве, препятствуя их уносу ветром или смыванию по склону при дожде.

В почвах и на поверхности горных участков очень много камней разных конфигураций и размеров [9, 10], которые препятствуют проведению почвообрабатывающих операций, в частности, внесению минеральных удобрений. В представленном агрегате реализован разбросной способ через высевные трубки 7 с разбросными конусами (рис. 2).

Особенность принципа высева удобрений состоит в том, что разбросная трубка подвешена на шарнире 6 к высевному аппарату и может при угле склона до  $15^\circ$  сохранять вертикальное положение, правильно и равномерно распределять гранулы по участку. Специальные высевные трубки при помощи шарнирного соединения могут отклоняться до  $20^\circ$  в любую сторону независимо от направления движения агрегата.

Гранулы 10 через патрубок 5 туковысевающего устройства поступают в специальный конус разбросной трубки 7. Хаотично высыпаящиеся гранулы превращаются в направленный поток, который, попадая на вершину конуса, равномерно распределяются по обрабатываемому участку.

Гранулы минеральных удобрений должны быть однородные размером не более 7 мм. Слежавшиеся удобрения предварительно надо измельчить и просеять через сито с отверстиями 7 мм. Для более надежной работы туковой сеялки следует предусмотреть возможно большее открытие высевной щели и малые обороты высевных тарелок. Угол при вершине конусной детали  $\alpha = 45^\circ$ , что обеспечивает равномерность попадания гранул на поверхность обрабатываемой зоны [11, 12]. Исследования показали, что равномерность высева удобрений на склоне горного участка при таком угле соответствует требованиям ГОСТ 28714-2024. «Межгосударственный стандарт. Техника сельскохозяйственная. Машины для внесения твердых минеральных удобрений. Методы испытаний».

Вместимость бункера для удобрений туковысевающего аппарата можно рассчитать по известной максимальной норме внесения минеральных удобрений (200 кг/га) и времени между заправками (1 ч):

$$E_{\text{бун}} = \frac{W_{\text{час}} \cdot N}{n \cdot \rho} \cdot k, \text{ м}^3, \quad (1)$$

где  $W_{\text{час}}$  – часовая производительность агрегата, га/ч;  $N$  – норма внесения удобрений (принята 200 кг/га);  $n$  – количество аппаратов (в нашем случае  $n = 1$ );  $\rho$  – плотность массы минеральных туков (по стандарту в среднем  $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$ );  $k$  – коэффициент запаса объема бункера (минимально необходимый по стандарту  $k = 1,2$ ).

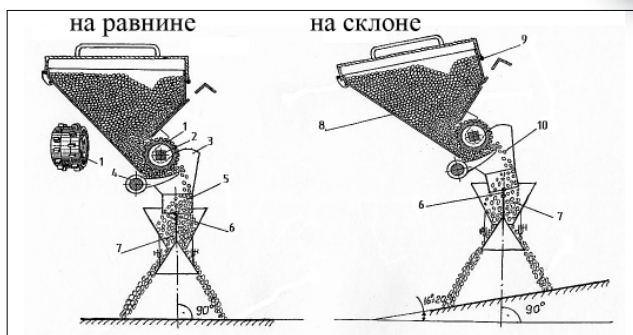


Рис. 2. Схема высева гранул удобрений катушечно-штифтовым аппаратом с разбросной трубкой

Fig. 2. Diagram of fertilizer granule dispensing using a coil-pin mechanism with a spreading tube for meadows and pastures

Часовая производительность

$$W_{\text{ч}} = \text{Ш}_p \cdot V_p \cdot K \cdot 0,1, \text{ га/ч}, \quad (2)$$

где  $\text{Ш}_p$  – рабочая ширина захвата ( $\text{Ш}_p = 2 \text{ м}$ );  $V_p$  – рабочая скорость устройства, км/ч;  $K$  – коэффициент рабочего времени ( $K = 0,8$ ).

Из формулы (1)

$$E_{\text{бун}} = \frac{\text{Ш}_p \cdot V_p \cdot K \cdot 0,1 \cdot N}{n \cdot \rho} \cdot k. \quad (3)$$

Вместимость бункера удобрений при заданных параметрах должна быть не менее  $0,224 \text{ м}^3$ .

При анализе вариантов и условий работы пришли к выводу, что новый агрегат должен обеспечивать нормы внесения удобрений от 30 до 200 кг/га [7]. Нормы внесения удобрений (Газданов А.У., Солдатов И.Э. Горные лугопастбищные угодья Северного Кавказа и пути их улучшения. – Владикавказ, 2006. – 92 с.) (табл. 1) зависят от высотных растительных поясов и должны обеспечиваться подбором сменных звездочек приводного механизма, что требует определения передаточных отношений цепной передачи привода [13, 14].

Согласно схеме лабораторного образца (рис. 1)

| Таблица 1<br>Нормы внесения удобрений / FERTILIZER APPLICATION RATES                             |                                                        |                         |                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------|----------------|
| Высотные пояса                                                                                   | Нормы внесения удобрений (кг/га действующего вещества) |                         |                |
|                                                                                                  | азот                                                   | фосфор                  | калий          |
| <b>Лугостепные пастбища:</b><br>с обилием бобовых (более 20%)<br>с обилием злаков (более 50%)    | 45<br>120                                              | 60-90<br>60             | 40<br>30       |
| <b>Лугостепные сенокосы:</b><br>с обилием бобовых<br>с обилием злаков<br>Сенокосы степного пояса | 30<br>60-90<br>30-60                                   | 60-90<br>30-60<br>30-60 | 30<br>30<br>45 |
| <b>Субальпийские пастбища:</b><br>на южных склонах<br>на северных склонах                        | 90-120<br>150-180                                      | 60-90<br>60             | 45<br>30       |
| <b>Субальпийские сенокосы:</b><br>на южных склонах<br>на северных склонах                        | 60<br>60-90                                            | 60<br>30                | 30<br>30       |

на устройстве установлен один бункер для гранул удобрения с 12 специальными аппаратами оригинальной маятниковой конструкции, осуществляющими разбросной высев.

Количество удобрений, которое по техническому заданию устройство должно высевать в расчете на один погонный метр при ширине захвата:

$$N_{п.м.а.} = \frac{N}{S}, \text{ кг}, \quad (4)$$

где  $N_{п.м.а.}$  – необходимая норма высева, кг/пог. м;  $N$  – норма высева, кг/га;  $S$  – длина пути при обработке 1 га, м.

Длина пути машины

$$S = \frac{10000}{Ш_p}, \text{ м}, \quad (5)$$

где  $Ш_p$  – ширина высева, м; 10000 – площадь одного гектара,  $м^2$ .

Подставив формулу (5) в (4), получим:

$$N_{м.п.а.} = \frac{N \cdot Ш_p}{10000}, \text{ кг}. \quad (6)$$

Нормированное количество гранул, выбрасываемое одним катушечным аппаратом, определяется по формуле:

$$N_{м.п.к.} = \frac{N \cdot Ш_p}{100}, \text{ кг}. \quad (7)$$

Для работы выбираем катушечно-штифтовый туковывсевающий аппарат.

В этом случае количество высеваемых за один оборот катушки удобрений

$$q = V_o \cdot \gamma, \text{ г}, \quad (8)$$

где  $q$  и  $V_o$  – вес и объем гранул/удобрений, проходящих через катушку за один оборот, соответственно г и  $см^3$ ;  $\gamma$  – объемный вес удобрений,  $г/см^3$ .

Объем удобрений, проходящих за один оборот через катушки, всегда отличается от ее рабочего объема. Особенность катушки в том, что она, вращаясь, сдвигает и перемещает так называемый активный слой гранул (вне желобков), а не только гранулы непосредственно в желобках.

Учитывая данное обстоятельство, должно выполняться условие

$$V_o = V_{ж} + V_{ак}, \text{ см}^3, \quad (9)$$

где  $V_{ж}$  и  $V_{ак}$  – объем удобрений в желобках и вне желобков (активный слой),  $см^3$  (в среднем  $V_{ак} = 0,3V_{ж}$ ).

Объем желобков

$$V_{ж} = \frac{\pi r^2}{4} \cdot n \cdot l, \text{ см}^2, \quad (10)$$

где  $r$  – радиус желобков, см ( $r = 0,06$ );  $n$  – количество желобков на катушке ( $n = 12$ );  $l$  – длина катушки, см ( $l = 4$ ).

После преобразований получаем формулу для

определения веса удобрений, проходящих через катушку за один оборот:

$$\dot{q} = 1,3 \frac{\pi r^2}{4} \cdot n \cdot l \cdot \gamma. \quad (11)$$

$$q = 1,3 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,036}{4} \cdot 12 \cdot 4 \cdot 1,2 = 2,12.$$

Принимаем  $q = 2$  г.

Далее определяем число оборотов катушки для высева туков, рассчитывая данные относительно прохода агрегатом 1 пог. м пути:

$$n_{кат} = \frac{N_{п.м.к.}}{q}, \text{ об/пог. м}, \quad (12)$$

где  $n_{кат}$  – число оборотов катушки при проходе агрегатом пути 1 пог. м;  $N_{п.м.к.}$  – количество туков, высеваемое одной катушкой на пути 1 пог. м.

После преобразований формулы (12)

$$n_{кат} = \frac{N \cdot Ш_p}{200}, \text{ об/пог. м}. \quad (13)$$

Число оборотов опорно-приводного колеса при проходе пути 1 пог. м

$$n_{п.к.} = \frac{1 \text{ м. п.}}{2\pi R}, \text{ об/пог. м}. \quad (14)$$

где  $n_{п.к.}$  – число оборотов опорно-приводного колеса при проходе 1 пог. м;  $R$  – радиус приводного колеса устройства, м

В этом случае число оборотов  $i$  привода от опорного колеса к высевающей катушке

$$i = \frac{n_{п.к.}}{n_{кат}}. \quad (15)$$

После преобразования формулы (15) с учетом значений из формул (13) и (14)

$$i = \frac{200}{N \cdot Ш_p \cdot \pi D}. \quad (16)$$

Данную формулу можно использовать для вычисления числа оборота приводного устройства опорно-приводного колеса, необходимых для высева разной нормы минеральных удобрений [14, 15].

Например, при норме высева 30 кг/га

$$i^1_{общ} = \frac{200}{30 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 0,45} = 2,35,$$

принимаем  $i^1_{общ} = 2,4$ ; при 90 кг/га:  $i^2 = 0,8$ ; при 200 кг/га:  $i^3 = 0,35$ .

Следовательно, сменные звездочки нужно выбирать в зависимости от нормы внесения минеральных удобрений и числа оборотов приводного устройства высевающего аппарата.

Как известно, на склонах необходимо соблюдать совмещение обработанных полос. Для этой операции на агрегате устанавливаются жидкостные маркеры с раствором гашеной извести, по их следу ориентируется переднее колесо трактора и обеспечивается совмещение полос. Длину маркера можно изменять в зависимости от колеи трактора [16].

**Основные технические характеристики устройства**

|                                                     |            |
|-----------------------------------------------------|------------|
| Диаметр круга разброса одной маятниковой трубки, см | 40         |
| Рабочая ширина захвата агрегата, м                  | 2,4        |
| Способ высева гранул                                | Разбросной |
| Количество туковывсевающих аппаратов                | 1          |
| Количество разбросных трубок                        | 12         |
| Производительность работы часовая, га/ч             | 1,12       |
| Рабочая скорость движения агрегата, км/ч            | 7          |
| Норма высева семян, кг/га                           | 3–40       |
| Уклон уклона участка, град.                         | До 16      |

Опытный образец агрегата с трактором МТЗ-82 показан на [рисунке 3](#).



Рис. 3. Лабораторный образец устройства для внесения удобрений

Fig. 3. General view of the laboratory sample

**Результаты и обсуждение.** Опыт по выявлению эффективности внесения минеральных удобрений агрегатом, модифицированным для горных условий [17, 18], проводился на террасированных землях (горный стационар СКНИИ ГПСХ, с. Даргавс) на трех высотных растительных поясах. Виды и нормы внесения минеральных удобрений при создании и восстановления деградированных, залежных сенокосов и пастбищ устанавливают с учетом

почвенных условий (почвенным картограммам) и ожидаемой урожайности луга.

Известно, что кормовые агрофитоценозы в горной местности обладают очень сложной структурой. Корневые системы горных трав располагаются в определенном порядке. Например, в верхнем горизонте (5–6 см) это мочкокорневые дернистые и корневищные злаки; ниже (15–20 см) – короткостержневые, корневые; в третьем горизонте (30 см и более) – длинностержневые растения. В такой же последовательности, как расположение горизонтов, на продуктивность трав оказывают влияние и минеральные удобрения.

В первый год улучшения горных участков путем внесения удобрений наибольшие прибавки урожая трав мочкокорневого типа: овсяницы овечьей, лисохвоста лугового, мятлика лугового и др. На второй год констатировали рост и развитие полустержневых видов: одуванчика Стивена, подорожника, колокольчика и др., т.е. при проникновении удобрений в более глубокие горизонты почвы. На третий год положительное влияние удобрений проявилось на длинностержневых видах: эспарцетах, вике, люцерне желтой и др. [19, 7].

Следовательно, для восстановления продукционных, структурных и качественных функций естественных травостоев на залежных угодьях требуется трехгодичное внесение удобрений, тогда как естественный восстановительный процесс происходит более 15–20 лет.

Таким образом, с помощью предлагаемого агрегата внесение удобрений с разными экспозициями склонов в короткий срок ранней весной позволяет увеличить урожай зеленой массы [20, 7] по трем высотным поясам: в лугостепном на 205,8; в субальпийском на 95,3; альпийском на 57,3 ц/га ([табл. 2](#)).

В собранном урожае сена увеличивается количество кормовых единиц и перевариваемого протеина. Это дает возможность при рациональном использовании (пастбище- и сенокосообороте) повысить погектарную нагрузку на нагульный мо-

Таблица 2

Table 2

**ПРОДУКТИВНОСТЬ ПАСТИЩНОГО КОРМА ПОСЛЕ ТРЕХЛЕТНЕГО ВНЕСЕНИЯ УДОБРЕНИЙ НА РАЗЛИЧНЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОЯСАХ**  
**PRODUCTIVITY OF PASTURE FEED AFTER THREE YEARS OF FERTILIZATION ACROSS VARIOUS VEGETATION ZONES**

| Высотные пояса | Вариант опыта | Урожай, ц/га  |                |       |                  |                     |
|----------------|---------------|---------------|----------------|-------|------------------|---------------------|
|                |               | зеленая масса | сухое вещество | ЭКЕ   | кормовые единицы | переваримый протеин |
| Лугостепной    | Контроль      | 66,6          | 13,6           | 27,4  | 12,8             | 2,1                 |
|                | N120P90K40    | 186,7         | 41,3           | 84,7  | 37,6             | 7,0                 |
|                | N240P90K40    | 272,4         | 57,6           | 114,6 | 50,4             | 10,8                |
| Субальпийский  | Контроль      | 51,2          | 10,4           | 21,0  | 9,8              | 1,6                 |
|                | N120P90K40    | 121,6         | 27,0           | 54,7  | 24,5             | 4,6                 |
|                | N240P90K40    | 146,5         | 30,9           | 61,7  | 27,1             | 5,7                 |
| Альпийский     | Контроль      | 52,3          | 10,6           | 21,5  | 10,0             | 3,1                 |
|                | N120P90K40    | 109,6         | 24,3           | 49,8  | 22,0             | 4,2                 |

Таблица 3

Table 3

**ВЛИЯНИЕ ЩЕЛЕВАНИЯ И ВНЕСЕНИЯ УДОБРЕНИЙ НА УРОЖАЙ И БОТАНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЛУГА**  
**INFLUENCE OF SLITTING AND FERTILIZATION ON MEADOW YIELD AND BOTANICAL COMPOSITION**

| Способ улучшения                                                                  | Урожай сухой массы, ц/га |      | Прибавка урожая, ц/га |      | Ботанический состав травостоя, % |      |         |      |             |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------|-----------------------|------|----------------------------------|------|---------|------|-------------|------|
|                                                                                   |                          |      |                       |      | злаки                            |      | бобовые |      | разнотравье |      |
|                                                                                   | Год эксперимента         |      |                       |      |                                  |      |         |      |             |      |
|                                                                                   | 1                        | 2    | 1                     | 2    | 1                                | 2    | 1       | 2    | 1           | 2    |
| Контроль (без обработки)                                                          | 5,8                      | 7,4  | —                     | 1,6  | 22,0                             | 24,4 | 1,1     | 1,6  | 76,3        | 74   |
| Щелевание через 1,5 м                                                             | 11,7                     | 15,6 | 5,9                   | 9,8  | 27,2                             | 32,0 | 2,0     | 3,8  | 70,8        | 64,2 |
| Щелевание через 1 м + удобрение N <sub>60</sub> P <sub>45</sub> K <sub>20</sub>   | 23,5                     | 34,6 | 11,8                  | 19,0 | 32,6                             | 38,2 | 6,4     | 10,7 | 61          | 51,1 |
| Щелевание через 1,5 м + удобрение N <sub>60</sub> P <sub>45</sub> K <sub>20</sub> | 32,9                     | 53,8 | 21,2                  | 38,2 | 35,2                             | 49,5 | 10,5    | 15,6 | 54,3        | 34,9 |
| Щелевание через 2,4 м + удобрение N <sub>60</sub> P <sub>45</sub> K <sub>20</sub> | 29,5                     | 42,6 | 17,8                  | 27,0 | 28,4                             | 34,7 | 7,2     | 11,8 | 64,4        | 53,5 |

лодняк крупного рогатого скота в лугостепном поясе почти до 6 усл. голов, в субальпийском – до 3 и альпийском поясе до 2 усл. голов. Срок пастбищного содержания продлится в горах на 40-45 дней, увеличится объем животноводческой продукции (среднесуточные привесы нагульного молодняка от 350 до 670-820 г), дополнительно будет заготовлен зимний корм в виде сена и сенажа.

В течение двух лет высев удобрений проводился параллельно с нарезкой щелей поперек склона без прикатывания катками, чтобы не обрушить и не деформировать щели. Для этого были выбраны сильно запущенные и деградированные участки на расстоянии 10 м от основного, чтобы почвенные показатели не сильно отличались.

Опыт проходил по схеме: без обработки (контроль); при щелевании без удобрений; при щелевании и внесении удобрений N<sub>60</sub>P<sub>45</sub>K<sub>20</sub> (табл. 3).

При внесении удобрений с щелеванием максимальный урожай кормов (32,9 ц/га) получен при расстоянии между нарезаемыми щелями 1,5 м. Прибавка урожая уже в первый год составила 5,9 ц/га по сравнению с контролем. Увеличению урожая способствовало сохранение влаги в нарезанных щелях за счет снижения стока талой воды по склону.

Урожай сухой массы отличался не очень силь-

но (57,6-53,8 ц/га). Анализируя данный результат, пришли к выводу, что в первом варианте (57,6 ц/га) существенную роль сыграли вносимые дозы удобрений N<sub>120</sub>P<sub>90</sub>K<sub>40</sub>, а во втором – задержание влаги в почве.

**Выводы.** Спроектирован, разработан и создан лабораторный образец малогабаритного агрегата, способного выполнять на горных участках операции по улучшению почвы методом внесения минеральных гранулированных удобрений с прикатыванием катками.

Также проведены эксперименты по высеву удобрений параллельно с нарезкой щелей поперек склона и определено влияние щелевания и внесения удобрений на урожай и ботанический состав деградированных участков.

Разработанный малогабаритный агрегат для внесения минеральных удобрений – обеспечит снижение деградационных процессов склоновых участков, улучшит качество и количество многолетних трав залежных кормовых угодий в короткие сроки (несколько лет), что будет способствовать использованию животными высококачественных кормов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Soldatov E., Dzhibilov S., Soldatova I., Guluyeva L. Restoration of degraded mountain pastures of the Central Caucasus by targeted sowing of seeds of perennial grasses. *E3S Web of Conferences*. 2020. 09013. DOI: 10.1051/e3s-conf/202017509013.
- Марченко О.С., Текушев А.Х., Уянаев Ю.Х. и др. Инновационные технологии и комплексы машин с активными рабочими органами для коренного улучшения сенокосов и пастбищ // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N1(30). С. 56-61. EDN: XPTXNJ.
- Ахалая Б.Х., Старовойтов С.И., Ценч Ю.С. и др. Комбинированный агрегат с универсальным рабочим органом для поверхностной обработки почвы // *Техника и оборудование для села*. 2020. N8(278). С. 8-11. DOI: 10.33267/2072-9642-2020-8-8-11.
- Джибилов С.М., Гулуева Л.Р., Коробейник И.А. Агрегат для сгребания камней с одновременным автоматическим подсевом трав на горные луга и пастбища Северного Кавказа // *Известия Горского государственного аграрного университета*. 2018. Т. 55. N1. С. 106-112. EDN: YTFUZF.
- Федорова О.А., Текушев А.Х., Чаплыгин М.Е., Давыдова С.А. Технологии и технические средства для поверхностного улучшения кормовых угодий // *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса*. 2022. N2(66). С. 404-414. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-02-50.

6. Кутузова А.А., Тебердиев Д.М., Родионова А.В. и др. Экономическая эффективность усовершенствованных технологий создания и использования сеяных сенокосов // *Кормопроизводство*. 2020. N3. С. 3-8. EDN: NGVSRE.
7. Солдатова И.Э., Солдатов Э.Д. Создание высокопродуктивных сенокосов и пастбищ в горной зоне Северного Кавказа // *Известия Горского государственного аграрного университета*. 2017. Т. 54. N3. С. 9-14. EDN: ZHELCF.
8. Савченко И.В. Ресурсосберегающее экологически чистое растениеводство для получения продукции высокого качества // *Вестник Российской академии наук*. 2019. Т. 89. N5. С. 527-531. DOI: 10.31857/S0869-5873895527-531.
9. Джибилов С.М., Гулуева Л.Р. Механизированный способ удаления и утилизации камней на горных склонах // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. N2. С. 23-28. DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-2-23-28.
10. Дмитриев С.Ю., Дмитриев Ю.П., Ценч Ю.С. Комплекс машин АГРОМАШ для обработки залежных земель // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N2(31). С. 40-47. EDN: RXFMCP.
11. Мазитов Н.К., Сахапов Р.Л., Шогенов Ю.Х. и др. Конкурентоспособный комплекс техники и технологии для производства зерна и кормов // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2019. Т. 20. N3. С. 299-308. DOI: 10.30766/2072-9081.2019.20.3.299-308.
12. Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С., Бейлис В.М. Создание и развитие систем машин и технологий для комплексной механизации технологических процессов в растениеводстве // *История науки и техники*. 2019. N12. С. 46-55. EDN: RJSVZT.
13. Ахалая Б.Х., Шогенов Ю.Х., Старовойтов С.И. и др. Трехсекционный почвообрабатывающий агрегат с универсальными сменными рабочими органами // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2019. Т. 14. N3(54). С. 92-95. DOI: 10.12737/article\_5db9656e2ade23.01560949.
14. Джибилов С.М., Солдатов Э.Д., Гулуева Л.Р., Солдатова И.Э. Способ решения проблемы деградации горных пастбищ Центрального Кавказа // *Аграрный вестник Урала*. 2020. N6 (197). С. 10-16. DOI: 10.32417/1997-4868-2020-197-6-10-16.
15. Кудзаев А.Б., Уртаев Т.А. Адаптивный энергосберегающий культиватор для обработки каменистых почв // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. Т. 9. N2. С. 28-32. EDN: TOCCOX.
16. Джибилов С.М., Гулуева Л.Р. Многофункциональный агрегат для улучшения горных лугов и пастбищ // *Известия Горского государственного университета*. 2016. Т. 53. N3. С. 103-111. EDN: WNDDZX.
17. Kudzaev A.B., Urtaev T.A., Tsgoev A.E. et al. Adaptive energy-saving cultivator equipped with the simultaneous adjuster of sections for working stony soils. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2017. N8(11). 714-720. EDN: XXBSDR.
18. Kudzaev A.B., Urtaev T.A., Tsgoev A.E. et al. Study of elastic composite rods for creating fuses of tilters. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2017. N8(11). 658-666. EDN: UXMTDK.
19. Джибилов С.М., Гулуева Л.Р. Технология и агрегат для восстановления экологического состояния горных лугов и пастбищ // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2023. Т. 17. N2. С. 20-27. DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-20-27.
20. Джибилов С.М., Гулуева Л.Р., Бестаев С.Г. Агрегат для подсева семян трав с одновременным внесением гранулированных удобрений на горные луга и пастбища // *Тракторы и сельхозмашины*. 2015. N5. С. 17-18. EDN: TUHZBR.

## REFERENCES

1. Soldatov E., Dzhibilov S., Soldatova I., Guluyeva L. Restoration of degraded mountain pastures of the central caucasus by targeted sowing of seeds of perennial grasses. *E3S Web of Conferences*. 2020. 09013 (In English). DOI: 10.1051/e3sconf/202017509013.
2. Marchenko O.S., Tekushev A.H., Uyanaev Yu.H. et al. Innovative technologies and complexes of machines with active working bodies for the radical improvement of hayfields and pastures. *Vestnik VIESKH*. 2018. N1(30). 56-61 (In Russian). EDN: XPTXNJ.
3. Akhalaia B.KH., Starovoitov S.I., Tsench Yu.S. et al. A combined unit fitted with a versatile working body for surface tillage. *Machinery and Equipment for Rural Area*. DOI: 10.33267/2072-9642-2020-8-8-11.
4. Dzhibilov S.M., Gulueva L.R., Korobeinik I.A. Plant for raking stones with synchronous automatic seeding of grasses on mountain meadows and pastures in the North Caucasus. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2018. Vol. 55. N1. 106-112(In Russian). EDN: YTFUZF.
5. Fedorova O.A., Tekushev A.H., Chaplygin M.E., Davydova S.A. Technologies and technical means for simplified improvement of forage lands. *Proceedings of the Lower Volga Agro University Complex*. 2022. N2(66). 404-414 (In Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2022-02-50.
6. Kutuzova A.A., Teberdiev D.M., Rodionova A.V. et al. Economic effectiveness of improved cultivation techniques for man-made hayfields. *Kormoproizvodstvo*. 2020. N3. 3-8 (In Russian). DOI: 10.25685/krm.2020.2020.61941.
7. Soldatova I.E., Soldatov E.D. Development of high-productive hey meadows and pastures in the mountain zone of the North Caucasus. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2017. Vol. 54. N3. 9-14 (In Russian). EDN: ZHELCF.
8. Savchenko I.V. Resource-saving organic crop production for high quality products. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2019. Vol. 89. N5. 527-531 (In Russian). DOI: 10.31857/S0869-5873895527-531.

9. Dzhibilov S.M., Gulueva L.R. Mechanized method for the removal and disposal of stones on mountain slopes. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020. Vol. 14. N2. 23-28 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2020-14-2-23-28.
10. Dmitriev S.Yu., Dmitriev Yu.P., Tsench Yu.S. AGROMASH machinery complex for processing of fallow land. *Vestnik VIESKH*. 2018. N2(31). 40-47 (In Russian). EDN: RXFMCP.
11. Mazitov N.K., Sakhapov R.L., Shogenov Yu.Kh. et al. Competitive complex of machinery and technologies for the production of grain and feed. *Agricultural Science Euro-North-East*. 2019. Vol. 20. N3. 299-308 (In Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.2019.20.3.299-308.
12. Lobachevskiy Ya.P., Tsench Yu.S., Beylis V.M. Creation and development of systems for machines and technologies for complex mechanization of technological processes in crop production]. *Istoriya nauki i tekhniki*. 2019. N12. 46-55 (In Russian). EDN: RJSVZT.
13. Ahalaya B.Kh., Shogenov Yu.Kh., Starovoytov S.I. et al. Three-section soil processing unit with universal replaceable working units. *Vestnik of the Kazan State Agrarian University*. 2019. Vol. 14. N3(54). 92-95 (In Russian). DOI: 10.12737/article\_5db9656e2ade23.01560949.
14. Dzhibilov S.M., Soldatov E.D., Guluyeva L.R., Soldatova I.E. The way to solve the problem of degradation of mountain pastures of the Central Caucasus. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2020. N6 (197). 10-16 (In Russian). DOI: 10.32417/1997-4868-2020-197-6-10-16.
15. Kudzaev A.B., Urtaev T.A. Adaptive energy-saving cultivator for stony soils cultivating. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2015. Vol. 9. N2. 28-32 (In Russian). EDN: TOCCOX.
16. Dzhibilov S.M., Gulueva L.R. Multifunctional aggregate for the mountain meadows and pastures improvement. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2016. Vol. 53. N3. 103-111 (In Russian). EDN: WNDDZX.
17. Kudzaev A.B., Urtaev T.A., Tsgoev A.E. et al. Adaptive energy-saving cultivator equipped with the simultaneous adjuster of sections for working stony soils. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2017. Vol. 8. N11. 714-720 (In English). EDN: XXBSDR.
18. Kudzaev A.B., Urtaev T.A., Tsgoev A.E. et al. Study of elastic composite rods for creating fuses of tilters. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2017. Vol. 8. N11. 658-666 (In English). EDN: UXMTDK.
19. Dzhibilov S.M., Gulueva L.R. Restoring technology and a seeding unit for recovering mountain meadow and pasture ecosystems. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023. Vol. 17. N2. 20-27 (In Russian). DOI: 10.22314/2073-7599-2023-17-2-20-27.
20. Dzhibilov S.M., Guluyeva L.R., Bestayev S.G. Unit for overseeding of grass seeds with simultaneous application of granular fertilizers on mountain meadows and pastures. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2015. N5. 17-18 (In Russian). EDN: TUHZBR.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

### Заявленный вклад соавторов:

Бидеев С.И. – формулирование основных направлений исследования, разработка теоретических предпосылок, формирование общих выводов;  
Гулueva Л.Р. – написание и доработка текста, литературный анализ, разработка эскизов, обработка результатов исследований, визуализация.  
Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант

### Coauthors' contribution:

Bideev S.I. – outlining the main research directions, developing theoretical framework and general conclusions.  
Guluyeva L.R. – writing and refining the manuscript, analyzing the literature, developing sketch, data processing, and visualization.  
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

04.04.2025  
14.05.2025