



НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№ 1 (81) 2026 ГОД

ВЕСТНИК

**Казанского государственного
аграрного университета**



DOI 10.31588/2073-0462

ISSN 2073-0462

ISSN 2073-0462
DOI 10.31588/2073-0462-2026-21-1

ВЕСТНИК
КАЗАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АГРАРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

VESTNIK
OF KAZAN STATE
AGRARIAN UNIVERSITY

SCIENTIFIC JOURNAL

№ 1 (81)

Казань, 2026



Учредитель и издатель:
ФГБОУ ВО «Казанский ГАУ»

Адрес редакции:
420015, Российская Федерация,
Республика Татарстан,
г. Казань, ул. К. Маркса, 65
тел. (843) 598 - 40 - 52

Официальный сайт журнала:
vestnik-kazgau.ru
E-mail:
vestnik@kazgau.com

Подписной индекс в каталоге
«Объединенный каталог.
Пресса России»
Газеты и журналы»
на I полугодие 2026 года:
40977

Зарегистрирован
Федеральной службой по надзору в
сфере связи,
информационных технологий и
массовых коммуникаций
(Роскомнадзор) -
свидетельство о регистрации: ПИ
№ ФС-77-48189
от 19 января 2012 г.

**По решению ВАК России
«Вестник Казанского государ-
ственного аграрного университе-
та» входит в Перечень ведущих
рецензируемых научных журна-
лов и изданий, в которых могут
быть опубликованы основные
научные результаты диссертаци-
онных работ на соискание
ученой степени кандидата и
доктора наук по направлениям:**

- 4.1.1. Общее земледелие и расте-
ниеводство (сельскохозяйственные
науки) с 01.02.2022;
- 4.1.2. Селекция, семеноводство и
технология (сельскохозяйственные
науки) с 22.11.2022;
- 4.1.3. Агрохимия, агропочвовед-
ение, защита и карантин растений
(сельскохозяйственные науки)
с 22.11.2022;
- 4.3.1. Технологии, машины и оборудо-
вание для агропромышленного
комплекса (технические науки)
с 22.11.2022;
- 5.2.3. Региональная и отраслевая
экономика (экономические науки)
с 22.11.2022;
- 5.2.6. Менеджмент (экономические
науки) с 22.11.2022.

Журнал включен
в Российский индекс
научного цитирования (РИНЦ)

Журнал «Вестник Казанского
государственного аграрного
университета» включен в базу
Russian Science Citation Index
(*RSCI*)

Публикуется
4 раза в год
Дата выхода в свет:
26.05.2026

Авторы несут ответственность за
содержание статьи и
достоверность представленных
данных

Научный журнал Вестник Казанского государственного аграрного университета, 2026, № 1 (81), май Учрежден Казанским государственным аграрным университетом (Казанским институтом сельского хозяйства и лесоводства) в 1925 г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Председатель редакционной коллегии, главный научный редактор

Валиев А.Р. – доктор технических наук, профессор, чл.-корр. АН РТ (Казанский государственный аграрный университет, Казань, Российская Федерация)

Заместители главного редактора:

Зиганшин Б.Г. – доктор технических наук, профессор, профессор РАН (Казанский государственный аграрный университет, Казань, Российская Федерация)

Калимуллин М.Н. – доктор технических наук, доцент (Казанский государственный аграрный университет, Казань, Российская Федерация)

Члены редакционной коллегии:

Басин А.В. – доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Самарский ФИЦ РАН, Ульяновский научно-исследовательский институт сельского хозяйства им. Н.С. Немыцева – филиал СамНЦ РАН, Ульяновск, Российская Федерация)

Дидмандзе О.Н. – доктор технических наук, профессор, академик РАН (Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация)

Дозорова Т.А. – доктор экономических наук, профессор (Ульяновский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, Ульяновск, Российская Федерация)

Ерохин М.Н. – доктор технических наук, профессор, академик РАН (Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация)

Исайчев В.А. – доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Ульяновский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, Ульяновск, Российская Федерация)

Кадырова Ф.З. – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, чл.-корр. АН РТ (Казанский государственный аграрный университет, Казань, Российская Федерация)

Клычова Г.С. – доктор экономических наук, профессор (Казанский государственный аграрный университет, Казань, Российская Федерация)

Курдюмов В.И. – доктор технических наук, профессор (Ульяновский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, Ульяновск, Российская Федерация)

Лобачевский Я. П. – доктор технических наук, академик РАН (Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация)

Мазитов Н.К. – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, чл.-корр. РАН (Казанский государственный аграрный университет, Казань, Российская Федерация)

Мухаметгалиев Ф.Н. – доктор экономических наук, профессор (Казанский государственный аграрный университет, Казань, Российская Федерация)

Низамов Р.М. – доктор сельскохозяйственных наук, доцент (Казанский государственный аграрный университет, Казань, Российская Федерация)

Пономарева М.Л. – доктор биологических наук, профессор (Татарский научно-исследовательский институт сельского хозяйства ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Российская Федерация)

Сафин Р.И. – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, чл.-корр. АН РТ (Казанский государственный аграрный университет, Казань, Российская Федерация)

Сафиоллин Ф.Н. – доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Казанский государственный аграрный университет, Казань, Российская Федерация)

Сорокин К.Н. – доктор технических наук (Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация)

Шоенов Ю.Х. – доктор технических наук, профессор, академик РАН (Российская академия наук, Москва, Российская Федерация)

Члены международной редакционной коллегии:

Абуова А.Б. – доктор сельскохозяйственных наук, профессор (Международный инженерно-технологический университет, Алматы, Республика Казахстан)

Акимбекова Г.У. – доктор экономических наук, профессор (Казахский НИИ экономики агропромышленного комплекса и развития сельских территорий, Алматы, Республика Казахстан)

Алещенкова З.М. – доктор биологических наук, профессор (Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь)

Байбусенов К.С. – PhD, ассоциированный профессор (Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Республика Казахстан)

Бауэр М.Ш. – доктор экономических наук, профессор (Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Республика Казахстан)

Бухарбаева А.Ж. – доктор Ph.D (Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Республика Казахстан)

Ли Хунтэн – доктор сельскохозяйственных наук, основатель Харбинской сельскохозяйственной научно-технической компании Лэши, главный научный сотрудник (Хэйлунцзянская Академия Сельскохозяйственных наук, Харбин, Китай)

Нго Као Кыонг – доктор биологических наук (Совместный Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр, Ханой, Вьетнам)

Нукешев С.О. – доктор технических наук, профессор (Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Республика Казахстан)

Панков Д.А. – доктор экономических наук, профессор (Белорусский государственный экономический университет, Минск, Республика Беларусь)

Сембиева Л.М. – доктор экономических наук, профессор (Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Республика Казахстан)

Хасанова Г.Ж. – PhD, и.о. ассоциированного профессора (Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Республика Казахстан)

Шеров К.Т. – доктор технических наук, профессор (Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина, Астана, Республика Казахстан)



Founder and Publisher:
Kazan State Agrarian University
(FSBEI HE Kazan SAU)

Editorial Address:
65 K. Marx St., Kazan, Republic of
Tatarstan, 420015,
Russian Federation
Tel.: +7 (843) 598-40-52

Official Journal Website:
vestnik-kazgau.ru
Email:
vestnik@kazgau.com

Subscription Index in the "United
Catalogue. Press of Russia,
Newspapers and Journals" for
the first half of 2026:
40977

Registered by the Federal Service for
Supervision of Communications,
Information Technology and
Mass Media — Registration
Certificate:
PI No. FS-77-48189,
issued January 19, 2012

In accordance with the decision of
the Higher Attestation Commission
(VAK) of Russia, the "Vestnik of
Kazan State Agrarian University" is
included in the List of Leading Peer-
Reviewed Scientific Journals and
Publications in which the principal
scientific results of dissertations for
the degrees of Candidate and Doctor
of Sciences may be published in the
following fields:

- 4.1.1. General Agriculture and Crop
Production (Agricultural Sciences)
since 01/02/2022;
- 4.1.2. Breeding, Seed Production and
Technology (Agricultural Sciences)
since 22/11/2022;
- 4.1.3. Agrochemistry, Agrosol Sci-
ence, Plant Protection and Quarantine
(Agricultural Sciences) since
22/11/2022;
- 4.3.1. Technologies, Machinery and
Equipment for the Agro-Industrial
Complex (Technical Sciences) since
22/11/2022;
- 5.2.3. Regional and Sectoral Econom-
ics (Economic Sciences) since
22/11/2022;
- 5.2.6. Management (Economic Scienc-
es) since 22/11/2022.

The journal "Vestnik of Kazan State
Agrarian University" is indexed in
the Russian Science Citation Index
(RSCI) database

Publication frequency:
4 issues per year
Date of publication:
May 26, 2026

The authors bear responsibility for the
content of the article and the accuracy
of the data presented

Scientific Journal Vestnik of Kazan State Agrarian University, 2026, No. 1 (81), May Founded by Kazan State Agrarian University (Kazan Institute of Agriculture and Forestry) in 1925.

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief:

Ayrat R. Valiev – Doctor of Engineering, professor, corresponding member of the Academy of Sciences of Tatarstan (Kazan State Agrarian University, Kazan, Russian Federation)

Deputy Editors:

Bulat G. Ziganshin – Doctor of Engineering, professor, professor of the Russian Academy of Sciences (Kazan State Agrarian University, Kazan, Russian Federation)

Marat N. Kalimullin – Doctor of Technical Sciences, associate professor (Kazan State Agrarian University, Kazan, Russian Federation)

Members of the Editorial Board:

Alexey V. Vasin – Doctor of Agriculture, professor (Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, N.S. Nemtsev Ulyanovsk Research Institute of Agriculture – Branch of the SamSC RAS, Ulyanovsk, Russian Federation)

Otari N. Didmanidze – Doctor of Technical Sciences, professor, member of the Russian Agricultural Academy of Sciences (Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation)

Tatyana A. Dozorova – Doctor of Economic Sciences, Professor (Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Ulyanovsk, Russian Federation)

Mikhail N. Erokhin – Doctor of Technical Sciences, Professor, member of the Russian Agricultural Academy of Sciences (Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation)

Vitaly A. Isaichev – Doctor of Agriculture, professor (Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Ulyanovsk, Russian Federation)

Fanusya Z. Kadyrova – Doctor of Agriculture, professor, corresponding member of the Academy of Sciences of Tatarstan (Kazan State Agrarian University, Kazan, Russian Federation)

Guzalia S. Klychova – Doctor of Economics, professor (Kazan State Agrarian University, Kazan, Russian Federation)

Vladimir I. Kurdyumov – Doctor of Engineering, professor (Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Ulyanovsk, Russian Federation)

Yakov P. Lobachevsky – Doctor of Engineering, member of the Russian Agricultural Academy of Sciences (Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation)

Nazib K. Mazitov – Doctor of Agriculture, professor, corresponding member of the Academy of Sciences of Tatarstan (Kazan State Agrarian University, Kazan, Russian Federation)

Farit N. Mukhametgaliev – Doctor of Economics, professor (Kazan State Agrarian University, Kazan, Russian Federation)

Rustam M. Nizamov – Doctor of Agriculture, associate professor (Kazan State Agrarian University, Kazan, Russian Federation)

Mira L. Ponomareva – Doctor of Biological Sciences, professor (Tatar Research Institute of Agriculture, FRC Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russian Federation)

Radik I. Safin – Doctor of Agriculture, professor, corresponding member of the Academy of Sciences of Tatarstan (Kazan State Agrarian University, Kazan, Russian Federation)

Faik N. Safiullin – Doctor of Agriculture, professor (Kazan State Agrarian University, Kazan, Russian Federation)

Konstantin N. Sorokin – Doctor of Technical Sciences (Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation)

Yury Kh. Shogenov – Doctor of Technical Sciences, professor, member of the Russian Agricultural Academy of Sciences (Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation)

Members of the International Editorial Board:

Altynay B. Abuova – Doctor of Agricultural Sciences, Professor (International Engineering and Technology University, Almaty, Republic of Kazakhstan)

Galiya U. Akimbekova – Doctor of Economics, Professor (Kazakh Research Institute of Economics of the Agro-Industrial Complex and Rural Development, Almaty, Republic of Kazakhstan)

Zinaida M. Aleshchenkova – Doctor of Biological Sciences, Professor (Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus)

Kurmet S. Baybusenov – PhD, Associate Professor (S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan)

Maira Sh. Bauer – Doctor of Economic Sciences, Professor (S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan)

Akmaral Zh. Bukharbaeva – Doctor Ph.D (Kyzylorda University named after Korkyt Ata, Kyzylorda, Republic of Kazakhstan)

Li Hongpeng – Doctor of Agricultural Sciences, Founder of Harbin Agricultural Science and Technology Company Chief Researcher (Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin, China)

Ngo Cao Cuong – Doctor of Biological Sciences (Joint Russian-Vietnamese Tropical Research and Technology Center, Hanoi, Vietnam)

Sayakhat O. Nukeshev – Doctor of Technical Sciences, Professor (S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan)

Dmitry A. Pankov – Doctor of Economics, professor (Belarusian State Economic University, Minsk, Republic of Belarus)

Lyazzat M. Sembieva – Doctor of Economics, professor (Eurasian National University, L.N. Gumilyov, Astana, Republic of Kazakhstan)

Gulmira Zh. Khasanova – PhD, Acting Associate Professor (S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan)

Karibek T. Sherov – Doctor of Technical Sciences, Professor (S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan)

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ

стр.

Михайлова М.Ю., Низамов Р.М., Миникаев Р.В., Шарафиева И.З., Фасхутдинов Ф.Ш. (Казань, Российская Федерация)	
Влияние препаратов Гумилайф и Батр цинк на формирование гибридом кукурузы высокопродуктивных посевов (на англ.).....	6
Батов А.С., Гуреева Ю.А., Колошина К.А., Сергеева Е.М., Каретников Д.И. (Новосибирск, Российская Федерация)	
Изучение биохимического состава клубней сортов картофеля для производства чипсов.....	14
Гамзаева Р.С. (Пушкин, Российская Федерация), Бекиш Л.П. (д. Белогорка, Российская Федерация)	
Динамика численности микроорганизмов ризосферы и элементы продуктивности тритикале озимой (x <i>Triticosecale</i> Wittm. ex A. Camus) при использовании микробных препаратов.....	21
Дёмин Е.А., Ахтямова А.А. (Тюмень, Российская Федерация)	
Температура и влажность почвы как факторы скорости эмиссии диоксида углерода при внесении возрастающих доз минеральных удобрений в посевах яровой пшеницы.....	29
Кадырова Ф.З., Галимзянов С.Ф. (Казань, Российская Федерация)	
Хозяйственно-биологические особенности перспективных линий яровой мягкой пшеницы на серых лесных почвах Предкамской зоны РТ.....	37
Мяжкова Е.Г., Еремин В.А., Бондаренко Т.Ю. (с. Соленое Займище, Российская Федерация)	
Оценка образцов хлопчатника с цветным волокном в условиях Астраханской области.....	44
Николаев П.Н., Юсова О.А., Шулико Н.Н., Тукмачева Е.В. (Омск, Российская Федерация)	
Формирование урожайности и качества зерна яровой мягкой пшеницы в зависимости от физиологии растений.....	51

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Дорохов А.С., Сибирёв А.В., Тетерин В.С., Мосяков М.А. (Москва, Российская Федерация)	
Обоснование рабочих органов автоматизированной машины для закладки на хранение картофеля.....	57
Кутырёв А.И., Филиппов Р.А. (Москва, Российская Федерация)	
Разработка автоматизированного метода прогнозирования урожайности земляники садовой с использованием БЛА и алгоритмов машинного обучения.....	69
Нуруллин Э.Г., Файзуллин Р.А., Фасхиев Р.Ф. (Казань, Российская Федерация)	
Математическая модель движения воздушно-зерновой смеси в пневмозагрузочном устройстве протравливателя семян зерновых культур.....	79
Попов А.М., Плотников К.Б., Мехдиев Р.В., Майтаков А.Л., Ветрова Н.Т. (Кемерово, Российская Федерация)	
Исследование изменения характеристик зацепления высоконагруженных зубчатых передач в условиях абразивного изнашивания.....	89
Ридный С.Д., Кулаев Е.В., Димитров А.А., (Ставрополь, Российская Федерация), Халиуллин Д.Т. (Казань, Российская Федерация), Мастепаненко М.А. (Ставрополь, Российская Федерация)	
Алгоритмическая модель управления дозированием тукосмеси для пневматического штангового агрегата.....	99
Харьков В.В., Николаев А.Н., Зиганин Б.Г. (Казань, Российская Федерация)	
Исследование эффективности газожидкостного сепарационного устройства для улавливания производственной пыли.....	110

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Баженова В.С., Малушко Д.Ж., Шобдоева Н.В., Полозова Т.В., Ванчикова Е.Н. (Улан-Удэ, Российская Федерация)	
Индекс аграрно-социального дисбаланса: методика оценки и типология сельских территорий (на примере Республики Бурятия).....	119
Говдя В.В., Дегальцева Ж.В. (Краснодар, Российская Федерация)	
Управление затратами на производство в аграрных формированиях на основе цифровых платформ.....	128
Китаёв Ю.А., Китаёва О.В. (Пушкин, Российская Федерация), Алейник Е.С. (п. Майский, Российская Федерация)	
Влияние экзогенных факторов на развитие АПК Белгородской области.....	137
Козырев А.Х., Кайтов А.А. (с. Михайловское, Российская Федерация)	
Проблемы и перспективы развития эфиромасличной отрасли в условиях горной зоны РСО-Алания.....	145
Мандрощенко О.В., Хоружий В.И. (Москва, Российская Федерация), Клычова Г.С. (Казань, Российская Федерация)	
Оценка инвестиций в основной капитал сельского хозяйства региона посредством налоговых механизмов.....	155
Мясников Д.А., Ягудина Е.В. (Казань, Российская Федерация)	
Устойчивое развитие агропромышленного комплекса в условиях кадрового дефицита.....	163
Сафиуллин М.Р., Шарапов А.Р., Ельшин Л.А., Абрахманова Д.Р. (Казань, Российская Федерация)	
Влияние критического импорта на перспективы развития аграрного сектора экономики региона.....	173

CONTENTS

AGRICULTURAL SCIENCES

pages

<i>Mikhailova M.Yu., Nizamov R.M., Minikaev R.V., Sharafieva I.Z., Faskhutdinov F.Sh. (Kazan, Russian Federation)</i>	
Effect of Gumilife and Batr zinc preparations on formation of high-productive corn hybrid crops (in English).....	6
<i>Batov A.S., Gureeva Yu.A., Koloshina K.A., Sergeeva E.M., Karetnikov D.I. (Novosibirsk, Russian Federation)</i>	
Study of biochemical composition of potato tubers used for chips production (in Russian).....	14
<i>Gamzaeva R.S. (Pushkin, Russian Federation), Bekish L.P. (Belogorka, Russian Federation)</i>	
Rhizosphere microbiological dynamics and productivity elements of winter triticale (x <i>Triticosecale</i> Wittm. ex A. Camus) using microbial preparations (in Russian).....	21
<i>Demin E.A., Akhtyamova A.A. (Tyumen, Russian Federation)</i>	
Soil temperature and moisture as factors of carbon dioxide emission rates when increasing doses of mineral fertilizers in spring wheat crops (in Russian).....	29
<i>Kadyrova F.Z., Galimzyanov S.F. (Kazan, Russian Federation)</i>	
Agroeconomic and biological characteristics of promising lines of spring soft wheat on gray forest soils of Kama zone of the Republic of Tatarstan (in Russian).....	37
<i>Myagkova E.G., Eremin V.A., Bondarenko T.Yu. (Solenoe Zaymishche village, Russian Federation)</i>	
Evaluation of cotton samples with colored fiber in Astrakhan region (in Russian).....	44
<i>Nikolaev P.N., Yusova O.A., Shuliko N.N., Tukmacheva E.V. (Omsk, Russian Federation)</i>	
Yield and grain quality development of spring soft wheat depending on plant physiology (in Russian).....	51

TECHNICAL SCIENCES

<i>Dorokhov A.S., Sibirev A.V., Teterin V.S., Mosyakov M.A. (Moscow, Russian Federation)</i>	
Justification of the operating units of automated machine for stored potatoes (in Russian).....	57
<i>Kutyrev A.I., Filippov R.A. (Moscow, Russian Federation)</i>	
Development of an automated method for forecasting strawberry yield using UAVs and machine learning algorithms (in Russian).....	69
<i>Nurullin E.G., Fayzullin R.A., Faskhiev R.F. (Kazan, Russian Federation)</i>	
Mathematical model of air-grain mixture movement in pneumo-loading device of grain seed treater (in Russian).....	79
<i>Popov A.M., Plotnikov K.B., Mekhdiev R.V., Maytakov A.L., Vetrova N.T. (Kemerovo, Russian Federation)</i>	
Investigation of changes in the gearing characteristics of highly loaded drives in conditions of abrasive wear (in Russian).....	89
<i>Ridnyy S.D., Kulaev E.V., Dimitrov A.A. (Stavropol, Russian Federation), Khaliullin D.T. (Kazan, Russian Federation), Mastepanenko M.A. (Stavropol, Russian Federation)</i>	
Algorithmic control model for fertilizer mixture dosing for a pneumatic boom spreader (in Russian).....	99
<i>Kharkov V.V., Nikolaev A.N., Ziganshin B.G. (Kazan, Russian Federation)</i>	
Study the efficiency of gas-liquid separation device for industrial dust collection (in Russian).....	110

ECONOMIC SCIENCES

<i>Bazhenova V.S., Malushko D.Zh., Shobdoeva N.V., Polozova T.V., Vanchikova E.N. (Ulan-Ude, Russian Federation)</i>	
Agrarian-social imbalance index: assessment methodology and typology of rural areas (case study of the Republic of Buryatia) (in Russian)	119
<i>Govdya V.V., Degaltseva Zh.V. (Krasnodar, Russian Federation)</i>	
Production cost management in agricultural enterprises based on digital platforms (in Russian).....	128
<i>Kitaev Yu.A., Kitaeva O.V. (Pushkin, Russian Federation), Aleynik E.S. (Mayskiy settlement, Russian Federation)</i>	
Influence of exogenous factors on development of agro-industrial complex in Belgorod region (in Russian).137	
<i>Kozyrev A.Kh., Kaytov A.A. (Mikhaylovskoe village, Russian Federation)</i>	
Problems and prospects for essential oil industry development in the mountains zone of the Republic of North Ossetia-Alania (in Russian).....	145
<i>Mandroschenko O.V., Khoruzhiy V.I. (Moscow, Russian Federation), Klychova G.S. (Kazan, Russian Federation)</i>	
Assessment of investments in regional agriculture capital through tax mechanisms (in Russian).....	155
<i>Miasnikov D.A., Yagudina E.V. (Kazan, Russian Federation)</i>	
Sustainable development of agro-industrial complex in conditions of personnel shortage (in Russian).....	163
<i>Safiullin M.R., Sharapov A.R., Elshin L.A., Abdrakhmanova D.R. (Kazan, Russian Federation)</i>	
Impact of critical imports on the development prospects of regional agricultural sector (in Russian).....	173

EFFECT OF GUMILIFE AND BATR ZINC PREPARATIONS ON FORMATION OF HIGH-PRODUCTIVE CORN HYBRID CROPS

© 2026 Mikhailova M. Yu. ✉, Nizamov R. M., Minikaev R. V., Sharafieva I. Z., Faskhutdinov F. Sh.

Kazan State Agrarian University
(Kazan, Russian Federation)
✉ marisha.m.u@mail.ru

Abstract. The study was conducted to assess the effect of Gumilife and Batr zinc on the overall development of corn during the growing season and the formation of green mass yield to improve the crop fertilization system. The work was conducted in 2019-2021 years in Kama region of the Republic of Tatarstan. Experimental scheme: nutrition background (factor A) - without fertilizers, NK at 50 t/ha, NK at 50 t/ha + foliar feeding with Batr zinc, NK at 50 t/ha + seed incrustation with Gumilife, NK at 50 t/ha + seed incrustation with Gumilife + foliar feeding with Batr zinc; hybrid (factor B) - early-ripening Nur and Bilyar-160, mid-early Voronezhskiy-279. Gumilife is an organic biologically active preparation containing humic, carboxylic acids, amino acids, saccharides, carbohydrates. Batr zinc is an organomineral fertilizer saturated with organic acids with a zinc content of 60 g/l. The use of NK combination preparations at a rate of 50 t/ha of green mass increased plant height by 7.7-22.6%, compared to the background without fertilizers, and aboveground mass by 11.8-27.2%, optimizing the ratio of cobs, stems and leaves in the forage. In the green mass of Nur hybrid, this ratio was 45.68:24.89:29.43. Improving the nutritional conditions of corn with the application of mineral fertilizers led to an increase in the yield of green mass of corn by 32-52%. Seed incrustation with Gumilife contributed to the formation of an increase from 2 to 8%, foliar feeding with Batr zinc – from 6 to 8%. The highest yield in the experiment was observed when growing Voronezhskiy-279 hybrid in the NK variant at 50 t/ha + Gumilife incrustation + Batr zinc foliar application – 52.03 t/ha.

Key words: corn (*Zea mays*), micronutrient fertilizer, organic acids, zinc, hybrids, green mass, yield.

For citation: Mikhailova MYu, Nizamov RM, Minikaev RV, et al. [Effect of Gumilife and Batr zinc preparations on formation of high-productive corn hybrid crops]. Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2026; Vol. 21. 1(81). 6-13 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-6-13

ВЛИЯНИЕ ПРЕПАРАТОВ ГУМИЛАЙФ И БАТР ЦИНК НА ФОРМИРОВАНИЕ ГИБРИДОМ КУКУРУЗЫ ВЫСОКОПРОДУКТИВНЫХ ПОСЕВОВ

© 2026 Михайлова М. Ю. ✉, Низамов Р. М., Миникаев Р. В., Шарафиева И. З., Фасхутдинов Ф. Ш.

Казанский государственный аграрный университет
(г. Казань, Российская Федерация)
✉ marisha.m.u@mail.ru

Реферат. Исследования проводили с целью изучения влияния препаратов Гумилайф и Батр цинк на общее развитие кукурузы в течение вегетации и формирование урожая зеленой массы для совершенствования системы удобрения культуры. Работу выполняли в 2019–2021 годы в Предкамье Республики Татарстан. Схема опыта: фон питания (фактор А) – без удобрений, НК на 50 т/га, НК на 50 т/га + листовая подкормка Батр цинк, НК на 50 т/га + инкрустация семян Гумилайф, НК на 50 т/га + инкрустация семян Гумилайф + листовая подкормка Батр цинк; гибрид (фактор В) – раннеспелые Нур и Биляр-160, среднеранний Воронежский-279. Гумилайф – органический биологически активный препарат, содержащий гуминовые, карбоновые кислоты, аминокислоты, сахараиды, углеводы, Батр цинк – органоминеральное удобрение, насыщенное органическими кислотами с содержанием цинка 60 г/л. Использование препаратов на фоне НК в расчете на 50 т/га зеленой массы увеличивало высоту растений, по отношению к фону без удобрений, на 7,7...22,6%, надземную массу – на 11,8...27,2%, оптимизировало соотношение початков, стеблей и листьев в кормах. В зеленой массе гибрида Нур это отношение составляло 45,68:24,89:29,43. Улучшение условий питания кукурузы при внесении минеральных удобрений приводило к увеличению урожайности зеленой массы кукурузы на 32...52%. Инкрустация семян препаратом Гумилайф способствовала формированию прибавки от 2 до 8%, листовая подкормка Батр цинк – от 6 до 8%. Наибольшую в опыте урожайность отмечали при выращивании гибрида Воронежский-279 в варианте НК на 50 т/га + инкрустация Гумилайф + листовая подкормка Батр цинк – 52,03 т/га.

Ключевые слова: кукуруза (*Zea mays*), микроудобрение, органические кислоты, цинк, гибриды, зеленая масса, урожайность.

Для цитирования: Влияние препаратов Гумилайф и Батр цинк на формирование гибридом кукурузы высокопродуктивных посевов / М.Ю. Михайлова, Р.М. Низамов, Р.В. Миникаев и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 6-13. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-6-13

Introduction. Corn, as a marginal crop, requires a balanced fertilization system to ensure high-yield crop yields, providing the crop with nutrients throughout the growing season [1, 2, 3]. Nutrient requirements are adjusted based on soil availability and the planned yield [4, 5, 6]. Proper hybrid selection allows for high yield increases with the same cultivation technology under different soil and climatic conditions [7]. A wide range of early-maturing hybrids extends the period of possible feeding of green corn as a succulent feed in cattle diets [8, 9].

The use of biological preparations, both for seed treatment and for crop spraying during the growing season, has a beneficial effect on plants [10, 11, 12]. Their use improves the absorption of nutrients from the soil, plants tolerate herbicide treatments better, stress is relieved, and increased yields and quality characteristics of the resulting feed have been noted [13, 14, 15].

Corn responds positively to foliar application of zinc [16]. Zinc is a component of enzymes and is essential for the formation of carbohydrates, proteins, and chlorophyll. Zinc-containing fertilizer applications are divided into two periods. The early period occurs during the 3-6 leaf stage, promoting active chlorophyll accumulation, increasing leaf area, and the formation of above-ground mass. The second period corresponds to the onset of flowering, promoting better cob development [17, 18, 19]. Therefore, the use of bio-preparations and zinc in the nutritional system of corn hybrids is essential for producing highly productive crops.

The aim of the research is to study the effect of the preparations Gumilife and Batr zinc on the general development of corn during the growing season, the formation of the yield of green mass for the improvement of the crop fertilization system.

Conditions, materials, and methods. The study was conducted on gray forest soils of the Middle Volga region in the Laishevsky municipal district of the Republic of Tatarstan from 2019 to 2021. The soil texture of the experimental plot was heavy loamy, with a humus content of 4.2–4.4% according to Tyurin (moderate), mobile phosphorus (very high) according to Kirsanov, over 280 mg/kg, and potassium (high), respectively. The soil pH was neutral (pH_{sol} = 6.1). We sown hybrids included in the State Register, suitable for cultivation in the Middle Volga region: Nur, Bilyar-160, and Voronezhsky-279. The first two hybrids are early-ripening, three-line, general-purpose and silage varieties, with FAO 150 and 160 classifications, respectively. The complex hybrid Voronezhsky-279 is a mid-early, general-purpose variety, with FAO 290 classification. Sowing was carried out when the soil warmed to 10–12°C. The seeding rate was 80,000 seeds/ha.

Experimental design:

Nutrition background (factor A) – no fertilizer, NK at 50 t/ha, NK at 50 t/ha + foliar application of BATR zinc, NK at 50 t/ha + seed incrustation with Gumilife, NK at 50 t/ha + seed incrustation with Gumilife + foliar application of BATR zinc; hybrid (factor B) – Nur, Bilyar-160, Voronezhsky-279.

Fertilizers were applied according to the experimental design at the rate of N157K267 based on the formation of 50 t/ha at the following times: potassium sulfate (534 kg/ha) before sowing under pre-sowing cultivation by broadcasting, nitrogen was applied fractionally - 262 kg/ha of ammonium nitrate (N89) during sowing and 200 kg/ha (N68) in inter-row cultivation in the phase of 5...6 leaves. For weed control, the soil herbicide Merlin 0.15 l/ha was used before the emergence of corn seedlings, and in the phase of 4...5 leaves - the herbicides Ballerina super 0.5 l/ha, Escudo 0.025 kg/ha, Biopower 0.2 l/ha. The accounting of biometric indicators was carried out in the phases of 7...8 leaves, panicleation, milky ripeness. Humilife is a natural, organic, biologically active product containing humic and carboxylic acids, amino acids, saccharides, and carbohydrates. Seeds were treated with Humilife the day before sowing at a rate of 0.5 l/t. Zinc batrate is a liquid organomineral fertilizer saturated with organic acids. The product contains 60 g/l of zinc and 86 g/l of sulfur (calculated as SO₃). Foliar feeding was performed at the 5-6 leaf stage at a rate of 1 l/ha.

Results and discussion. The positive effects of Gumilife and Batr zinc were noted on plant height (Table 1). During the initial stages of development, height varied from 79.3 to 86.3 cm for the Bilyar-160 hybrid; 76.5 to 83.6 cm for the Voronezhsky-279 hybrid; and 76.6 to 91.5 cm for the Nur hybrid. By the panicle stage, the Nur hybrid achieved the highest plant height across all studied variants. By the milky stage, the height of this hybrid's plants was inferior to those of hybrids with a higher FAO value, especially the Voronezhsky-279 hybrid. For the studied products, the combined use of Gumilife and Batr zinc, in combination with mineral fertilizers, outperformed the others. At the head-forming stage, the height of the hybrid plants was 157.5 cm (Bilyar-160), 160.1 cm (Voronezhsky-279), and 164.7 cm (Nur). The plant height increase from these products ranged from 7.0% to 15.0%. Batr zinc increased plant height by 5% to 13%, while treatment with Gumilife increased the height by 4% to 9%. This trend continued during subsequent corn growth. The highest plant heights in the experiment were observed in the variant using the combined treatments: 176.9 cm (Nur), 188.6 cm (Bilyar-160), and 233.9 cm (Voronezhskiy-279). A correlation was found between the hybrid's

FAO value and plant height. From the early stages of development until flowering, hybrids with an FAO of 150 grow and develop faster, but growth slows towards milky ripeness.

Conversely, hybrids with an FAO greater than 200 continue to grow from flowering to milky ripeness, resulting in greater height than early-ripening hybrids.

Table 1 – Plant height (average for 2019–2021), cm

Таблица 1 — Высота растений (в среднем за 2019–2021 годы), см

Nutritional Background (Factor A)	Hybrid (Factor B)	Development Stage		
		7-8 leaves	paniculation	milky ripeness
No fertilizers	Nur	76.6	143.2	152.4
NK at 50 t/ha		87.2	154.5	167.3
NK at 50 t/ha + Batr zinc		88.1	161.9	173.2
NK at 50 t/ha + Gumilife		87.9	156.6	170.4
NK at 50 t/ha + Gumilife + Batr zinc		91.5	164.7	176.9
Average		86.3	156.2	168.0
No fertilizers	Bilyar-160	79.3	147.3	166.6
NK at 50 t/ha		83.2	151.6	173.9
NK at 50 t/ha + Batr zinc		83.7	154.1	178.7
NK at 50 t/ha + Gumilife		83.5	153.6	179.5
NK at 50 t/ha + Gumilife + Batr zinc		86.3	157.5	188.6
Average		83.2	152.8	177.5
No fertilizers	Voronezhsky-279	76.5	143.7	206.3
NK at 50 t/ha		80.8	154.1	212.6
NK at 50 t/ha + Batr zinc		81.3	156.7	217.5
NK at 50 t/ha + Gumilife		81.2	155.3	213.4
NK at 50 t/ha + Gumilife + Batr zinc		83.6	160.1	233.9
Average		80.7	154.0	216.7
No fertilizers	Average	77.5	144.7	175.1
NK at 50 t/ha		83.7	153.4	184.6
NK at 50 t/ha + Batr zinc		84.4	157.6	189.8
NK at 50 t/ha + Gumilife		84.2	155.2	187.8
NK at 50 t/ha + Gumilife + Batr zinc		87.1	160.8	199.8
Average		83.4	154.3	187.4
LSD ₀₅ A		10.6	15.0	22.9
LSD ₀₅ B		23.7	33.5	51.2
LSD ₀₅ AB		28.3	21.9	27.3

Aboveground weight varied significantly across experimental treatments during the milky-wax stage of grain maturity (Table 2). Without fertilizer, it ranged from 26.12 to 42.49 t/ha. Mid-early hybrids also showed an advantage in this indicator. With the application of calculated rates of mineral fertilizer, aboveground weight increased by 3.06 to 5.72 t/ha compared to the unfertilized control, with the greatest increase in early-ripening hybrids. Foliar application of zinc fertilizer resulted in an increase in aboveground mass of 3.5–8.0%, compared to the NK macronutrient application at 50 t/ha. The difference from

the control was 11.0–31.0%. Gumilife treatment increased aboveground mass by 2.04–3.99 t/ha, compared to the control. However, when comparing this treatment with the NK macronutrient application at 50 t/ha, only the Voronezhsky-279 hybrid had a higher aboveground mass, by 0.62 t/ha. On average, the Voronezhsky-279 hybrid demonstrated the highest aboveground mass in the experiment, while in terms of nutritional backgrounds, the treatment with the combined application of the studied preparations was inferior to the NK macronutrient application at 50 t/ha + Batr zinc foliar application by 1.23 t/ha.

Table 2 – Aboveground mass of corn in the milk ripeness phase of grain (average for 2019–2021), t/ha

Таблица 2 – Надземная масса кукурузы в фазе молочной спелости зерна (в среднем за 2019–2021 годы), т/га

Nutritional Background (Factor A)	Hybrid (Factor B)			
	Nur	Bilyar-160	Voronezhsky-279	Average
No fertilizers	26.12	28.42	42.49	32.34
NK at 50 t/ha	31.66	34.14	45.55	37.12
NK at 50 t/ha + Batr zinc	34.22	36.28	47.16	39.22
NK at 50 t/ha + Gumilife	28.16	32.41	46.17	35.58
NK at 50 t/ha + Gumilife + Batr zinc	30.29	36.17	47.50	37.99
Average	30.09	33.48	45.77	
LSD ₀₅ A	4.13			
LSD ₀₅ B	4.58			
LSD ₀₅ AB	9.24			

When growing corn for green fodder, green forage, or silage, it's important to consider the ratio of cobs, stalks, and leaves in the feed. A 45-55% cob/green fodder ratio increases the nutritional value of the feed. Leaves are also rich in carotene. The studied practices influenced these parameters (Table 3). A high proportion of cobs was formed in the variants with foliar feeding with zinc and seed treatment with Gumilife (45.56% – Voronezhskiy-279;

47.51% – Bilyar-160; and 45.58% – Nur). The Nur hybrid in this variant also demonstrated an optimal ratio of stems and leaves in the green mass (24.89 to 29.43%). The Bilyar-160 hybrid was found to be responsive to improved nutritional conditions with an optimal ratio of cobs, stems, and leaves. It amounted to 45.42: 27.10: 27.48. Fertilization had a beneficial effect on the formation and subsequent development of cobs, as well as good foliage of the entire plant.

Table 3 – The share of leaves, stems and cobs in the green mass of corn in the milky-wax ripeness phase of grain (average for 2019–2021), %

Таблица 3 – Доля листьев, стеблей и початков в зелёной массе кукурузы в фазе молочно-восковой спелости зерна (в среднем за 2019–2021 годы), %

Nutritional Background (Factor A)	Hybrid (Factor B)	Plant part		
		cobs	stems	leaves
No fertilizers	Nur	36.63	53.93	9.44
NK at 50 t/ha		41.24	32.11	26.65
NK at 50 t/ha + Batr zinc		43.82	24.88	31.30
NK at 50 t/ha + Gumilife		42.63	26.87	30.50
NK at 50 t/ha + Gumilife + Batr zinc		45.68	24.89	29.43
Average		42.00	32.54	25.46
No fertilizers	Bilyar-160	41.49	21.33	37.18
NK at 50 t/ha		45.71	28.53	25.76
NK at 50 t/ha + Batr zinc		46.36	29.12	24.52
NK at 50 t/ha + Gumilife		46.02	29.00	24.98
NK at 50 t/ha + Gumilife + Batr zinc		47.51	27.54	24.95
Average		45.42	27.10	27.48
No fertilizers	Voronezhsky-279	39.08	33.27	27.64
NK at 50 t/ha		40.25	31.95	27.80
NK at 50 t/ha + Batr zinc		40.93	32.09	26.98
NK at 50 t/ha + Gumilife		41.23	30.29	28.48
NK at 50 t/ha + Gumilife + Batr zinc		45.56	33.02	21.42
Average		41.41	32.12	26.46
No fertilizers	Average	39.07	36.18	24.75
NK at 50 t/ha		42.40	30.86	26.74
NK at 50 t/ha + Batr zinc		43.70	28.70	27.60
NK at 50 t/ha + Gumilife		43.29	28.72	27.99
NK at 50 t/ha + Gumilife + Batr zinc		46.25	28.48	25.27
Average		42.94	30.59	26.47
LSD ₀₅ A		5.29	4.06	3.53
LSD ₀₅ B		11.83	9.07	7.89
LSD ₀₅ AB		27.41	30.22	29.64

Green mass yield at the milky-wax stage of grain maturity varied significantly across the experimental variants (Table 4). In the control, it ranged from 25.63 to 45.81 t/ha. Applying the calculated rates of mineral fertilizers resulted in a yield increase of 10.84 to 13.32 t/ha, with the Nur hybrid showing the greatest response. Foliar application of zinc increased green mass yield in the studied hybrids by 43 to 64%, while seed treatment with Humilife increased yield by 40 to 53%. The highest yield of the sown hybrids was observed in the NK variant at 50 t/ha + Gumilife incrustation + Batr zinc foliar application (45.81; 46.45; 52.03 t/ha). The highest yield increase in the

experiment was also recorded for the Nur hybrid – 20.18 t/ha. The mid-early Voronezhsky-279 hybrid provides higher green forage yields compared to early-maturing hybrids. Each additional measure to improve corn nutritional conditions further increases yield.

On average, applying the calculated rates of mineral fertilizers increases yield by 41%, while additional foliar application of Batr zinc increases yield by 52%, and seed treatment with Humilife increases yield by 46%. Combined application of Humilife and Batr zinc, coupled with improved mineral nutrition, results in a 64% increase compared to the control and a 16% increase compared to the background.

Table 4 – Yield of green mass of corn in the milky-wax ripeness phase of grain (average for 2019-2021), t/ha

Таблица 4 – Урожайность зелёной массы кукурузы в фазе молочно-восковой спелости зерна (в среднем за 2019–2021 годы), т/га

Nutritional Background (Factor A)	Hybrid (Factor B)	Yield, t/ha
No fertilizers	Nur	25.63
NK at 50 t/ha		38.95
NK at 50 t/ha + Batr zinc		42.18
NK at 50 t/ha + Gumilife		39.33
NK at 50 t/ha + Gumilife + Batr zinc		45.81
Average		38.38
No fertilizers	Bilyar-160	28.49
NK at 50 t/ha		40.66
NK at 50 t/ha + Batr zinc		43.42
NK at 50 t/ha + Gumilife		41.37
NK at 50 t/ha + Gumilife + Batr zinc		46.45
Average		40.08
No fertilizers	Voronezhsky-279	33.66
NK at 50 t/ha		44.50
NK at 50 t/ha + Batr zinc		48.16
NK at 50 t/ha + Gumilife		47.35
NK at 50 t/ha + Gumilife + Batr zinc		52.03
Average		45.14
No fertilizers	Average	29.26
NK at 50 t/ha		41.37
NK at 50 t/ha + Batr zinc		44.59
NK at 50 t/ha + Gumilife		42.68
NK at 50 t/ha + Gumilife + Batr zinc		48.10
Average		41.20
LSD ₀₅ A		4.57
LSD ₀₅ B		10.21
LSD ₀₅ AB		24.88

Conclusions. In the Middle Volga region, on gray forest soils in the Republic of Tatarstan, the use of Gumilife for seed encrustations and Batr zinc for foliar application in the 5-6 leaf stage, at a calculated NK background rate of 50 t/ha, resulted in a 10% increase in maize plant height, starting from the 7-8 leaf stage. During the milk stage of grain maturity, this indicator reached its maximum values in the experiment, ranging from 176.9 to 233.9 cm. The mid-season hybrid grows and develops more slowly at the beginning of the growing season and more intensively after flowering than the early-ripening hybrids. Therefore, plant height in the milky stage of maturity increased across the experimental variants in the Nur, Bilyar-160, and Voronezhsky-279 hybrid series, depending on the ripening time (FAO 150 to 290). The increase in aboveground mass with improved nutrient conditions compared to the unfertilized variant was 7–21%, with the use of Gumilife compared to the background level – 1.4%, and with foliar zinc application – 3.5–8.0% compared to the background level. The combined use of mineral fertilizers and the preparations Gumilife and Batr zinc resulted in an increase in

aboveground mass, relative to background levels, of 4.17 to 7.75 t/ha. The mid-early hybrid Voronezhsky-279 achieved the highest green mass yield in the experiment, with the calculated rates of mineral fertilizers and the preparations studied applied, at 52.03 t/ha. Seed incrustation with Humilife before sowing and foliar application of Batr zinc, combined with mineral nutrition designed for a yield of 50 t/ha, contributed to a near-optimal ratio of cobs, stems, and leaves in the harvested forage. The highest response to the studied products was observed in the Nur hybrid. The increase in yield from the application of calculated rates of mineral fertilizers and the use of Humilife and Batr zinc was 20.18 t/ha.

Acknowledgments. The work was supported by a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to higher education institutions, research organizations and other organizations to support personnel development plans in terms of encouraging their research and scientific-pedagogical staff to defend doctoral dissertations and conduct research (Agreement dated December 22, 2025 No. 16/2025-PD-KazSAU).

References

1. Efficiency of the biopreparation Biostim on crops of irrigated corn Ross 140 SV / F. N. Safiollin, I. F. Yakhin, M. M. Khismatullin, et al. // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2024. Vol. 19. No. 3 (75). Pp. 33–39. doi: 10.12737/2073-0462-2024-33-39.
2. Safin R. I., Ziganshin A. A. Effect of the use of liquid organomineral fertilizers on the yield and quality of green mass of corn // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2025. Vol. 20. No. 3 (79). Pp. 39–44. doi: 10.12737/2073-0462-2025-20-3-39-44.
3. Mikhailova M. Yu., Talanov I. P. Nutritional value of corn hybrids when grown for green mass // Agrarian science. 2016. No. 4. pp. 9–11.
4. Sabirova R. M., Shakirov R. S., Bismukhametov Z. M. Bioplant Flora – a new generation fertilizer // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2019. Vol. 14. No. 2 (53). Pp. 37–42. doi: 10.12737/article_5d3e15f17c3223.64554857.
5. Mikhailova M. Yu., Minikaev R. V. Dynamics of macroelements in gray forest soil under corn crops for green mass in the conditions of the Volga region of the Republic of Tatarstan with the application of increased doses of mineral fertilizers // Plodorodie. 2020. No. 3 (114). Pp. doi: 10.25680/S19948603.2020.114.03.
6. Forecasting the yield of spring wheat by agrochemical properties in the conditions of the Tetyushsky region of the Republic of Tatarstan / A. A. Lukmanov, Yu. P. Perevedentsev, A. B. Mustafina, etc. // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2023. T. 18. No. 3 (71). pp. 39–45. doi: 10.12737/2073-0462-2023-39-45.
7. Productivity of corn Ross 140 depending on the level of chemicalization of zonal soils of the Republic of Tatarstan / F. N. Safiollin, M. M. Khismatullin, A. A. Lukmanov, etc. // Bulletin of the Soil Institute named after. V.V. Dokuchaeva. 2023. No. 115. pp. 199–223. doi: 10.19047/0136-1694-2023-115-199-223.
8. Mukhamadiev R. Kh., Nizamov R. M., Malikov M. M. Feed mixtures in the forage production system of the Republic of Tatarstan // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2017. Vol. 12. No. 4 (46). Pp. 20–22. doi: 10.12737/article_5a5f049c9a5b93.89385750.
9. Talanov I. P., Mikhailova M. Yu., Karimova L. Z. Responsiveness of corn hybrids to the application of calculated doses of mineral fertilizers in the conditions of the Cis-Volga region of the Republic of Tatarstan // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2015. Vol. 10. No. 2 (36). Pp. 123–127. doi: 10.12737/12516.
10. Productivity of agricultural crops with the use of biopreparations based on rhizosphere bacteria (PGPR) / L. Z. Karimova, L. S. Nizhegorodtseva, V. A. Kolesar, et al. // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2019. Vol. 14. No. S4-1(55). – P. 52–58.
11. The effect of foliar feeding on the formation of generative organs in corn / M. Yu. Mikhailova, R. V. Minikaev, M. F. Amirov, et al. // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2024. Vol. 19. No. 1 (73). P. 12–17. doi: 10.12737/2073-0462-2024-12-17.
12. Eryashev A. P., Artemyev A. A., Khnykin T. V. Effect of fertilizers and growth regulator on corn grain yield // Vestnik of Ulyanovsk State Agricultural Academy. 2025. No. 3 (71). pp. 6–12. doi: 10.18286/1816-4501-2025-3-6-12.
13. Economic indicators of the biological system for protecting sunflower from head rot in the soil and climatic conditions of the Republic of Tatarstan / F. N. Safiollin, M. M. Khismatullin, G. S. Minnullin, et al. // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2023. Vol. 18. No. 1 (69). Pp. 147–154. doi: 10.12737/2073-0462-2023-147-154.
14. The influence of primary tillage methods and fertilizers on the dynamics of soil moisture, water consumption, and yield of corn when grown for silage / V. N. Fomin, M. M. Nafikov, V. V. Medvedev, et al. // Achievements of science and technology in the agro-industrial complex. 2017. T. 31. No. 12. P. 12–16.
15. Ziganshin A. A., Safin R. I. Features of grain corn yield formation using foliar feeding with organomineral fertilizers // Agrobiotechnology and digital farming. 2024. No. 3 (11). Pp. 28–33. doi: 10.12737/2782-490X-2024-28-33.
16. The influence of fertilizers on corn yield in Stavropol Krai / V. N. Bagrintseva, I. N. Ivashenko, V. V. Dridiger, et al. // Achievements of science and technology in the agro-industrial complex. 2023. Vol. 37. No. 7. Pp. 29–33. doi: 10.53859/02352451_2023_37_7_29.
17. The Impact of Chemicalization on the Formation of the Yield of Green Mass of Corn with Cobs of Milky-Wax Ripeness / I. F. Yakhin, R. Kh. Gabitov, M. M. Khismatullin, et al. // Agrobiotechnology and Digital Farming. 2023. No. 2 (6). Pp. 44–51. doi: 10.12737/2782-490X-2023-44-51.
18. Nafikov M. M., Khafizova A. R. Cultivation of Forage Crops in Single-Species and Mixed Crops in the Western Trans-Kama Region of the Republic of Tatarstan // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2010. Vol. 5. No. 2 (16). Pp. 138–142.
19. Chemical composition of feed depending on the methods of primary tillage and nutritional backgrounds / V. V. Medvedev, V. N. Fomin, M. M. Nafikov et al. // Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2020. Vol. 15. No. 1 (57). P. 32–37. doi: 10.12737/2073-0462-2020-32-37.

Литература

1. Эффективность биопрепарата Биостим на посевах орошаемой кукурузы Росс 140 СВ / Ф. Н. Сафиоллин, И. Ф. Яхин, М. М. Хисматуллин и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2024. Т. 19. № 3 (75). С. 33–39. doi: 10.12737/2073-0462-2024-33-39.
2. Сафин Р. И., Зиганшин А. А. Влияние применения жидких органоминеральных удобрений на урожайность и качество зеленой массы кукурузы // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2025. Т. 20. № 3 (79). С. 39–44. doi: 10.12737/2073-0462-2025-20-3-39-44.
3. Михайлова М. Ю., Таланов И. П. Питательная ценность гибридов кукурузы при возделывании на зеленую массу // Аграрная наука. 2016. № 4. С. 9–11.
4. Сабирова Р. М., Шакиров Р. С., Бикмухаметов З. М. Биоплант Флора – удобрение нового поколения // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2019. Т. 14. № 2 (53). С. 37–42. doi: 10.12737/article_5d3e15f17c3223.64554857.
5. Михайлова М. Ю., Миникаев Р. В. Динамика макроэлементов в серой лесной почве под посевами кукурузы на зеленую массу в условиях Предволжья Республики Татарстан при внесении повышенных доз минеральных удобрений // Плодородие. 2020. № 3 (114). С. 12–14. doi: 10.25680/S19948603.2020.114.03.

6. Прогнозирование урожайности яровой пшеницы по агрохимическим свойствам в условиях Тетюшского района Республики Татарстан / А. А. Лукманов, Ю. П. Переведенцев, А. Б. Мустафина и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18. № 3 (71). С. 39–45. doi: 10.12737/2073-0462-2023-39-45.
7. Продуктивность кукурузы Росс 140 в зависимости от уровня химизации зональных почв республики Татарстан / Ф. Н. Сафиоллин, М. М. Хисматуллин, А. А. Лукманов и др. // Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 2023. № 115. С. 199–223. doi: 10.19047/0136-1694-2023-115-199-223.
8. Мухамадиев Р. Х., Низамов Р. М., Маликов М. М. Кормосмеси в системе кормопроизводства Республики Татарстан // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2017. Т. 12. № 4 (46). С. 20–22. doi: 10.12737/article_5a5f049c9a5b93.89385750.
9. Таланов И. П., Михайлова М. Ю., Каримова Л. З. Отзывчивость гибридов кукурузы на внесения расчетных доз минеральных удобрений в условиях Предволжья РТ // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2015. Т. 10. № 2 (36). С. 123–127. doi: 10.12737/12516.
10. Продуктивность сельскохозяйственных культур при применении биопрепаратов на основе ризосферных бактерий (PGPR) / Л. З. Каримова, Л. С. Нижегородцева, В. А. Колесар и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2019. Т. 14. № S4-1(55). – С. 52–58.
11. Влияние некорневых подкормок на формирование генеративных органов у кукурузы / М. Ю. Михайлова, Р. В. Миникаев, М. Ф. Амиров и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2024. Т. 19. № 1 (73). С. 12–17. doi: 10.12737/2073-0462-2024-12-17.
12. Еряшев А. П., Артемьев А. А., Хныкин Т. В. Влияние удобрений и регулятора роста на урожайность зерна кукурузы // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 3(71). С. 6–12. doi: 10.18286/1816-4501-2025-3-6-12.
13. Экономические показатели биологической системы защиты подсолнечника от корзиночных гнилей в почвенно-климатических условиях Республики Татарстан / Ф. Н. Сафиоллин, М. М. Хисматуллин, Г. С. Миннуллин и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18. № 1 (69). С. 147–154. doi: 10.12737/2073-0462-2023-147-154.
14. Влияние способов основной обработки почвы и удобрений на динамику влажности почвы, водопотребление и урожайность кукурузы при выращивании на силос / В. Н. Фомин, М. М. Нафиков, В. В. Медведев и др. // Достижения науки и техники АПК. 2017. Т. 31. № 12. С. 12–16.
15. Зиганшин А. А., Сафин Р. И. Особенности формирования урожая кукурузы на зерно при использовании некорневой подкормки органоминеральными удобрениями // Агробиотехнологии и цифровое земледелие. 2024. № 3 (11). С. 28–33. doi: 10.12737/2782-490X-2024-28-33.
16. Влияние удобрений на урожайность кукурузы в Ставропольском крае / В. Н. Багринцева, И. Н. Ивашененко, В. В. Дридингер и др. // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. № 7. С. 29–33. doi: 10.53859/02352451_2023_37_7_29.
17. Влияние средств химизации на формирование урожая зеленой массы кукурузы с початками молочно-восковой спелости / И. Ф. Яхин, Р. Х. Габитов, М. М. Хисматуллин и др. // Агробиотехнологии и цифровое земледелие. 2023. № 2 (6). С. 44–51. doi: 10.12737/2782-490X-2023-44-51.
18. Нафиков М. М., Хафизова А. Р. Возделывание кормовых культур в одновидовых и смешанных посевах в Западном Закамье РТ // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2010. Т. 5. № 2 (16). С. 138–142.
19. Химический состав кормов в зависимости от способов основной обработки почвы и фонов питания / В. В. Медведев, В. Н. Фомин, М. М. Нафиков и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2020. Т. 15. № 1 (57). С. 32–37. doi: 10.12737/2073-0462-2020-32-37.

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

Authors:

Mikhailova Marina Yurievna – Ph.D. of Agricultural Sciences, Associate Professor of Agrochemistry and Soil Science Department Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: marisha.m.u@mail.ru, ORCID 0000-0002-0894-9275

Nizamov Rustam Mingazovich – Doctor of Agricultural Sciences, Professor of General Agriculture, Plant Protection and Breeding Department Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: nizamovr@mail.ru, ORCID 0000-0002-5436-9351

Minikaev Rogat Vagizovich – Doctor of Agricultural Sciences, Head of Agrochemistry and Soil Science Department Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: ragat@mail.ru, ORCID 0000-0002-0860-2642

Sharafieva Ilyusa Zulfatovna – post-graduate student of Agrochemistry and Soil Science Department Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: kurbangalieva_1999@mail.ru

Faskhutdinov Fannur Shaukatovich – Ph.D. of Agricultural Sciences, Associate Professor of Agrochemistry and Soil Science Department Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: ditto1961t@mail.ru, ORCID 0000-0002-0860-2642

Contribution of the authors:

M.Y. Mikhailova – Supervision, Conceptualization, Validation, Investigation, Writing — Original Draft, Writing — Review & Editing, Visualization;

R.M. Nizamov – Supervision;

R.V. Minikaev – Validation;

I.Z. Sharafieva – Investigation;

F.Sh. Faskhutdinov – Formal Analysis.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 04.05.2025; revised 31.03.2026; accepted 01.04.2026.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Михайлова Марина Юрьевна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры агрохимии и почвоведения Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), e-mail: marisha.m.u@mail.ru, ORCID 0000-0002-0894-9275

Низамов Рустам Мингазизович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры общего земледелия, защиты растений и селекции Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), e-mail: nizamovr@mail.ru, ORCID 0000-0002-5436-9351

Минникаев Рогать Вагизович – доктор сельскохозяйственных наук, зав. кафедрой агрохимии и почвоведения Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), e-mail: ragat@mail.ru, ORCID 0000-0002-0860-2642

Шарафиева Илюса Зульфатовна – аспирант кафедры агрохимии и почвоведения Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), e-mail: kurbangalieva_1999@mail.ru

Фасхутдинов Фаннур Шаукатович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры агрохимии и почвоведения Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), e-mail: ditto1961t@mail.ru, ORCID 0000-0002-0860-2642

Вклад авторов:

М.Ю. Михайлова – научное руководство, концептуализация, валидация, проведение исследования, подготовка оригинального текста, рецензирование и редактирование текста, визуализация.

Р.М. Низамов – научное руководство;

Р.В. Минникаев – валидация;

И.З. Шарафиева – проведение исследования;

Ф.Ш. Фасхутдинов – формальный анализ.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 04.05.2025; одобрена после рецензирования 31.03.2026; принята к публикации 01.04.2026.



ИЗУЧЕНИЕ БИОХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КЛУБНЕЙ СОРТОВ КАРТОФЕЛЯ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЧИПСОВ

© 2026 Батов А. С. ✉, Гуреева Ю. А., Колошина К. А., Сергеева Е. М., Каретников Д. И.

Сибирский научно-исследовательский институт растениеводства и селекции – филиал
Федерального исследовательского центра Института цитологии и генетики
Сибирского отделения Российской академии наук
(г. Новосибирск, Российская Федерация)
✉ alexandr-batov@mail.ru

Реферат. Исследования проводили с целью изучения биохимического состава 18 сортов картофеля отечественной селекции в условиях Западной Сибири для производства чипсов. Работу выполняли в 2022–2024 годы в Новосибирской области. За стандарт принят сорт Леди Клер, широко используемый в чипсовой промышленности. Почва опытного участка – чернозем выщелоченный среднеспелый. Закладку опыта и учеты проводили в соответствии с методикой ВНИИКС. Биохимическую оценку клубней выполняли по методике Ермакова А. И., качество ломтиков хрустящего картофеля оценивали визуально по шкале HunterLab. Метеоусловия в годы исследований отличались значительной вариабельностью с чередованием периодов дефицита и избыточного увлажнения в течение вегетации. Средняя урожайность выше 29 т/га отмечена у сортов Евпатий (29,4 т/га), Башкирский (29,9 т/га) и Арго (29,9 т/га). По коэффициенту адаптивности (Ка) выделили сорта Самородок (Ка = 1,42), Шах (Ка = 1,41) и Евпатий (Ка = 1,17), которые характеризовались высокой продуктивностью и устойчивостью к условиям региона. Наибольшее содержание сухого вещества отмечено у сортов Надежда (29,24%), Артур (28,29%) и Вычегорский (28,60%), крахмала – у Вычегорского (19,12%) и Артура (17,85%), а минимальный в эксперименте уровень редуцирующих сахаров (0,22%), обеспечивающий светлую окраску чипсов, – у сортов Евпатий, Артур и Розовый Чародей. По пригодности для переработки на чипсы лидируют Евпатий, Артур и Надежда (9 баллов). Сорт Евпатий (сухое вещество 25,21%, сахара 0,22%, урожайность 29,4 т/га) выступает наиболее перспективной альтернативой Леди Клер. Сорта Артур и Надежда также пригодны для чипсов, но при их выращивании необходима оптимизация агротехники для повышения продуктивности.

Ключевые слова: картофель (*Solanum tuberosum* L.), чипсы, биохимический состав, сухое вещество, крахмал, сахар, урожайность.

Для цитирования: Изучение биохимического состава клубней сортов картофеля для производства чипсов / А.С. Батов, Ю.А. Гуреева, К.А. Колошина и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 14-20. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-14-20

STUDY OF BIOCHEMICAL COMPOSITION OF POTATO TUBERS USED FOR CHIPS
PRODUCTION

© 2026 Batov A. S. ✉, Gureeva Yu. A., Koloshina K. A., Sergeeva E. M., Karetnikov D. I.

Siberian Research Institute of Plant Production and Breeding – branch of Federal Research Center,
Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
(Novosibirsk, Russian Federation)
✉ alexandr-batov@mail.ru

Abstract. The study was conducted to assess the biochemical composition of 18 domestically bred potato varieties used in chip production in Western Siberia. The work was conducted from 2022 to 2024 in Novosibirsk region. Lady Kler variety, which is widely used in the chip industry, was selected as the standard. The soil of the experimental plot was medium-deep leached chernozem. The experiment was established and records were collected according to All-Russian Research Institute of Potato Crops (VNIICKh) methodology. Biochemical assessment of tubers was performed according to A.I. Ermakov's method, the quality of the crispy potato slices was assessed visually using HunterLab scale. Meteorological conditions during the study years were significantly variable, with alternating periods of deficient and abundant moisture throughout the growing season. Average yields exceeding 29 t/ha were observed for Evpatiy (29.4 t/ha), Bashkirskiy (29.9 t/ha) and Argo (29.9 t/ha) varieties. Samorodok (Ka = 1.42), Shakh (Ka = 1.41) and Evpatiy (Ka = 1.17) varieties were distinguished based on the adaptability coefficient (Ka), which are characterized by high productivity and tolerance to regional conditions. The highest dry matter content was observed in Nadezhda (29.24%), Artur (28.29%) and Vychegorskiy (28.60%) varieties, while the highest starch content was found in Vychegorskiy (19.12%) and Artur (17.85%). The lowest reducing sugar content (0.22%), which ensures the light color of chips, was found in Evpatiy, Artur and Rozovyy Charodey varieties. Evpatiy, Artur and Nadezhda (9 points) were the leaders in terms of suitability for processing into chips. Evpatiy variety (dry matter 25.21%, sugars 0.22%, yield 29.4 t/ha) is the most promising alternative to Lady Kler. Arthur and Nadezhda varieties are also suitable for chip production, but their cultivation requires optimized agricultural practices to increase productivity.

Key words: potato (*Solanum tuberosum* L.), chips, biochemical composition, dry matter, starch, sugars, yield.

For citation: Batov AS, Gureeva YuA, Koloshina KA, et al. [Study of biochemical composition of potato tubers used for chips production]. Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2026; Vol. 21. 1(81). 14-20 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-14-20

Введение. Переработка картофеля становится всё более актуальным направлением для картофелеводческих хозяйств. Это связано прежде всего со сложностями транспортировки и хранения продовольственного картофеля, тогда как переработанная продукция отличается лучшей сохранностью, удобством логистики и высокой рентабельностью. В России ключевыми направлениями переработки картофеля выступают производство полуфабрикатов, снеков, хлопьев, крахмала, картофельной муки, декстринов, этанола, глюкозы, кормов для животных и биоразлагаемых пластиков [1]. Тем не менее, в нашей стране практически не осуществляется целенаправленная селекция отечественных сортов картофеля, предназначенных для промышленной переработки, поскольку главным требованием для регистрации сорта, разрешенного к выращиванию в РФ, по-прежнему остается высокая продуктивность. В результате российские перерабатывающие компании существенно зависят от импортных технических сортов картофеля. Показательным примером служит Новосибирская область, где для производства чипсов «Лейс» компании PepsiCo местные фермеры выращивают зарубежный сорт Леди Клэр. Для обеспечения продовольственной безопасности и импортозамещения необходимо развивать селекцию отечественных технических сортов, особенно тех, которые подходят для производства чипсов, что и определяет актуальность нашего исследования [2, 3].

Переработка картофеля на чипсы требует строгого соответствия сырья определённым технологическим параметрам. Одним из ключевых показателей качества клубней выступает содержание сухого вещества, которое прямо влияет на выход готовой продукции, её текстуру и экономическую эффективность переработки. Согласно данным ряда исследований, сорта с содержанием сухого вещества не менее 20% считаются оптимальными для производства картофельных чипсов, причем лучшие результаты демонстрируют сорта с уровнем показателя 20...25% [4].

Важным компонентом сухого вещества картофеля служит крахмал, составляющий до 75...80% от его массы. Высокое содержание крахмала способствует получению продукта с характерной плотной и хрустящей текстурой, что особенно важно для чипсовой продукции. Соотношение сухого вещества и крахмала также оказывает влияние на технологические потери и эффективность жарки [5].

Критический биохимический параметр, определяющий пригодность сорта для переработки в чипсы – содержание редуцирующих сахаров, которое в сыром картофеле должно составлять не более 0,35% (по сырой массе), а в идеале – менее 0,25%. Превышение этих

значений приводит к активному протеканию реакции Майяра в процессе жарки при температурах около 160...180°C, способствуя интенсивному потемнению ломтиков и образованию нежелательных соединений, включая акриламид [6].

Аскорбиновая кислота (витамин С), несмотря на отсутствие прямого влияния на качество чипсов, рассматривается как показатель потенциальной устойчивости к окислительным процессам [7].

Кроме биохимических показателей, при отборе сортов картофеля для переработки учитывают и морфологические характеристики клубней. Предпочтение отдают сортам с овальной или округлой формой, гладкой кожурой и неглубокими глазками, что снижает потери при механической очистке и повышает технологичность сырья [8, 9].

То есть, комплексная оценка биохимического состава и морфологических признаков клубней позволяет выделить сорта, обладающие высоким потенциалом для использования в чипсовой промышленности [10].

Цель исследований – изучение биохимического состава 18 сортов картофеля отечественной селекции в условиях Западной Сибири для производства чипсов.

Условия, материалы и методы. Работу выполняли на базе Сибирского научно-исследовательского института растениеводства и селекции – филиала «Федерального исследовательского центра Института цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук» (СибНИИРС – филиал ИЦиГ СО РАН). Полевые данные за 2022–2024 годы получены на опытном поле в поселке Мичуринский (Новосибирская область, Новосибирский район). В качестве материала для исследования отобраны 18 сортов картофеля различных групп спелости: ранней (03), среднеранней (04) и среднеспелой (05), обозначенных соответствующими кодами в таблицах. В качестве сорта-стандарта использован зарубежный сорт Леди Клэр, широко применяемый в переработке картофеля на чипсы.

Закладку опыта и учеты осуществляли в соответствии с методикой Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт картофельного хозяйства имени А.Г. Лорха» [11]. Схема посадки стандартная – 0,70 м × 0,35 м, размер учетной делянки составлял 1,4 м по ширине и 3,5 м по длине. Почвенный покров представлен выщелоченным черноземом средней мощности. Глубина гумусового слоя около 40 см. Агрохимическая характеристика пахотного слоя почвы (0...30 см) следующая: содержание гумуса (по Тюрину) – 5,0%, общего азота (по Кьельдалю) – 0,34%, валового фосфора – 0,30%, подвижного фосфора и калия

(по Чирикову) – 290 и 130 мг/кг почвы соответственно, рН=6,7...6,8 ед.

Биохимическую оценку клубневого урожая проводили в аналитической лаборатории СибНИИРС по методике Ермакова А. И. [12]. Качество ломтиков хрустящего картофеля оценивали визуально по шкале «HunterLab» [13] с градацией от 1 до 9 баллов, где 8...9 – высокопригодный, 7 – пригодный, 6 – среднепригодный, 5 – слабопригодный, 4 и менее – непригодный. Коэффициент адаптивности рассчитывали по методике выявления потенциальной продуктивности и адаптивности сортов по параметру «урожай-нось» [14]. Математическую обработку данных проводили методом дисперсионного анализа с использованием программного обеспечения SNEDECOR.

Метеорологические данные за период исследований (2022–2024 годы) были получены от агрометеостанции «Огурцово» (табл. 1). Погодные условия в течение вегетационного периода в указанные годы отличались значительной вариабельностью, что оказало различное влияние на формирование урожая картофеля. Критическим периодом для обеспечения высокой урожайности выступает фаза клубнеобразования (июнь-июль), когда достаточное количество осадков необходимо для оптимального роста и развития растений. Напротив, избыточное увлажнение в осенний период (август-сентябрь) затрудняет уборку урожая, повышает риск развития заболеваний, таких как фитофтороз и различные виды гнилей, а также снижает качество клубней.

Таблица 1 – Метеорологические условия в годы исследований

Table 1 – Meteorological conditions during the research years

Месяц	Температура воздуха, °C				Количество осадков, мм			
	норма	2022	2023	2024	норма	2022	2023	2024
Май	11,9	15,3	11,8	11,3	37	2,5	5,5	69,5
Июнь	17,6	19,0	19,0	19,5	55	58,8	26,1	112,9
Июль	19,5	18,5	21,6	21,6	68	47,8	62,3	80,2
Август	16,9	16,6	17,8	18,4	58	22,8	112,3	132,7

В 2022 году вегетационный период характеризовался жаркими и засушливыми условиями. В мае температура воздуха достигла 15,3°C (при норме 11,9°C), а количество осадков составило всего 2,5 мм (при норме 37 мм), что привело к дефициту влаги на ранних стадиях роста растений. В июне осадки (58,8 мм) были близки к средним многолетним значениям (55 мм), однако в июле их уровень снизился до 47,8 мм (при норме 68 мм), что ограничило влагообеспеченность в критический период клубнеобразования, отрицательно сказываясь на формировании урожая.

В 2023 году погодные условия также отличались повышенными температурами, но с более выраженной контрастностью. В мае температура воздуха составила 11,8°C при норме 11,9°C, а количество осадков было 5,5 мм при норме 37 мм, что указывало на дефицит влаги на ранних стадиях роста, в июне количество осадков составило лишь 26,1 мм (при норме 55 мм), а в июле – 62,3 мм (при норме 68 мм), что указывает на недостаток влаги в ключевой фазе формирования клубней. В августе, напротив, отмечено аномальное переувлажнение (112,3 мм против нормы 58 мм), что затруднило уборочные работы и создало предпосылки для развития гнилей, негативно влияя на

качество и сохранность урожая.

В 2024 году вегетационный период характеризовался повышенными температурами и избыточной влагообеспеченностью. Температура воздуха в июле достигла 21,6°C при норме 19,5°C, а количество осадков в июне (112,9 мм при норме 55 мм) и августе (132,7 мм при норме 58 мм) значительно превысило средние многолетние значения, что привело к переувлажнению почвы. Эти условия затруднили доступ воздуха к корням, вызвали раскрытие чечевичек на клубнях и ухудшили их развитие, что отрицательно сказалось на потенциале урожайности. Избыточное увлажнение осложнило уборку и способствовало развитию фитофтороза.

Результаты и обсуждение. Биохимический состав клубней картофеля, включая содержание сухого вещества, крахмала, аскорбиновой кислоты и редуцирующих сахаров, существенно влияет на их пригодность для производства хрустящего картофеля (табл. 2). Среди изученных сортов содержание сухого вещества варьировало от 20,94 до 29,24%. Наибольшее в опыте, статистически значимое, накопление сухого вещества, в сравнении со стандартом отмечено у сортов Надежда (29,24%), Вычегодский (28,60%) и Артур (28,29%).

Таблица 2 – Биохимический состав клубней сортов и пригодность для хрустящего картофеля, среднее за 2022–2024 годы

Table 2 – Biochemical composition of tubers by variety and suitability for crispy potatoes, average for 2022–2024

Сорт	Год включения в реестр	Сухое вещество, %	Крахмал, %	Аскорбиновая кислота, мг/100 г	Сахара, %	Хрустящий картофель, балл
1	2	3	4	5	6	7
Арго	2022	24,39	15,30*	20,40*	0,85	6
Артур	2023	28,29*	17,85*	13,60	0,22*	9
Башкирский	2007	20,94	12,75	15,30	0,49	8
Вычегодский	2021	28,60*	19,12*	15,30	0,46	6
Глория	2013	25,43	15,30*	22,10*	0,85	6

Продолжение таблицы 2 / Table 2 (continued)

1	2	3	4	5	6	7
Евпатий	2021	25,21	12,75	17,00	0,22*	9
Калужский	2014	24,37	15,30*	20,40*	0,45	7
Кетский	2008	25,31	15,30*	20,40*	0,85	7
Леди Клэр, st	2005	26,14	12,75	15,30	0,46	9
Надежда	2009	29,24*	17,85*	17,00	0,45	9
Орлан	2024	26,45	15,81*	15,30	0,65	6
Принцесса Натаван	2025	22,20	15,30*	12,90	0,22*	6
Розовый Чародей	2023	22,88	15,30*	13,60	0,22*	7
Самородок	2025	23,70	15,30*	17,00	0,65	7
Тайфун	2025	24,09	15,30*	17,00	0,46	7
Фарн	2022	24,97	16,57*	18,70*	0,46	6
Чародей	2000	23,10	15,94*	20,40*	0,46	6
Шах	2023	25,40	17,85*	20,40*	0,65	7
Среднее (x)		25,04	15,65	17,34	0,50	
Стандартное отклонение, Sx		2,19	1,78	2,83	0,21	
Диапазон средних значений, min/max		20,94 / 29,24	12,75 / 19,12	12,9 / 22,1	0,22 / 0,85	
Коэффициент вариации, V, %		8,75	11,37	16,32	42,0	
HCP ₀₅		1,54	1,25	1,99	0,15	

Содержание крахмала влияет на плотность и хрупкость чипсов, выступая важным параметром качества. У изученных сортов величина этого показателя колеблется от 12,75% у сортов Леди Клэр, Евпатий и Башкирский до 19,12% у сорта Вычегодский. Оптимальный диапазон 12...18% обеспечивает сбалансированные характеристики готового продукта, что подтверждается большинством исследованных образцов. Содержание крахмала у 88% изученных сортов образцов достоверно превышало показатели сорта стандарта. Наибольшие значения отмечены на сортах Вычегодский (19,12%), Артур (17,85%), Надежда (17,85%) и Шах (17,85%).

Концентрация аскорбиновой кислоты характеризует антиоксидантные свойства клубней и варьирует от 12,90 мг/100 г у сорта Принцесса Натаван до 22,10 мг/100 г у сорта Глория. Хотя этот показатель не имеет прямого влияния на процесс жарки, он отражает устойчивость клубней к окислению и их пищевую ценность. Достоверное превышение содержания аскорбиновой кислоты, относительно сорта Леди Клэр, было выявлено у 7 изученных образцов: Глория (22,10%), Арго (20,40%), Калужский (20,40%), Кетский (20,40%), Чародей (20,40%), Шах (20,40%) и Фарн (18,70%).

Ключевое значение для пригодности сортов к производству чипсов имеет содержание редуцирующих сахаров, так как они определяют поведение клубней при термической обработке. При жарке высокий уровень сахаров (более 0,5%) вызывает их карамелизацию и подгорание, что ухудшает цвет и вкус чипсов, а также приводит к образованию канцерогенного акриламида. У 4 из 17 исследованных сортов (Евпатий, Артур, Розовый Чародей и Принцесса Натаван) величина этого показателя была отмечена на уровне 0,22%, что достоверно ниже значения сорта-стандарта. Чем ниже содержание сахаров, тем лучше клубни подходят для переработки.

Статистический анализ биохимического состава клубней картофеля показывает, что среди исследованных сортов содержание сухого

вещества в среднем составляет 25,04% с низкой вариативностью (коэффициент вариации – 8,75%), крахмала – 15,65% с умеренной изменчивостью (11,37%), аскорбиновой кислоты – 17,34 мг/100 г с более высокой вариабельностью (16,32%), тогда как содержание сахаров демонстрирует значительную изменчивость (коэффициент вариации 42%) в диапазоне от 0,22% до 0,85%, что существенно влияет на технологические свойства клубней при жарке.

Ломтики чипсов сортов Леди Клэр, Евпатий, Артур и Надежда получили 9 баллов по международной цветовой шкале «Хантер Лаб», что указывает на их высокую пригодность к переработке. Анализ биохимического состава подтверждает эту оценку: Леди Клэр (сухое вещество 26,14%, сахара 0,46%, крахмал 12,75%), Евпатий (25,21%, 0,22%, 12,75%), Артур (28,29%, 0,22%, 17,85%) и Надежда (29,24%, 0,45%, 17,85%) имеют высокое содержание сухого вещества (выше 25%) и низкий или умеренный уровень сахаров (0,22...0,46%), что соответствует требованиям к светлой и равномерной окраске ломтиков. Сорт Башкирский с 8 баллами (соответственно 20,94%, 0,49%, 12,75%) близок к нижней границе по сухому веществу, низкое содержание сахаров обеспечивает приемлемый цвет. Сорта с 7 баллами (например, Самородок – 23,70%, 0,65%, 15,30%; Шах – 25,40%, 0,65%, 17,85%) и 6 баллами (например, Арго – 24,39%, 0,85%, 15,30%; Глория – 25,43%, 0,85%, 15,30%) демонстрируют более высокие значения сахаров, что приводит к потемнению и снижению оценки.

То есть, биохимические параметры, особенно содержание сахаров, четко коррелируют с визуальной оценкой по шкале «Хантер Лаб», подтверждая пригодность сортов с оценкой 9 баллов для переработки.

Кроме пригодности для переработки и оптимального биохимического состава, важным показателем при выборе сортов картофеля выступает их урожайность и способность адаптироваться к климатическим условиям региона выращивания (табл. 3).

Таблица 3 – Урожайность и коэффициент адаптивности сортов картофеля
Table 3 – Yield and adaptability coefficient of potato varieties

Сорт	Группа спелости	Урожайность, т/га				Коэффициент адаптивности (Ka)
		2022	2023	2024	среднее	
Арго	03	30,9	26,5	32,4	29,9	1,20
Артур	04	24,1	26,0	11,6	20,6	0,79
Башкирский	03	33,2	30,7	25,9	29,9	1,18
Вычегорский	04	30,5	19,7	15,2	21,8	0,83
Глория	03	24,9	19,8	12,0	18,9	0,73
Евпатий	05	30,5	26,9	30,9	29,4	1,17
Калужский	03	38,4	29,5	18,5	28,8	1,10
Кетский	05	22,4	16,6	10,7	16,6	0,63
Леди Клэр, st	03	29,8	27,4	26,5	27,9	1,10
Надежда	05	19,6	14,9	10,5	15,0	0,58
Орлан	04	33,1	36,6	15,9	28,5	1,10
Принцесса Натаван	04	34,4	22,0	29,4	28,6	1,13
Розовый Чародей	04	28,3	17,2	27,6	24,4	0,97
Самородок	04	42,5	36,2	30,2	36,3	1,42
Тайфун	05	19,7	21,3	24,5	21,8	0,88
Фарн	04	31,9	21,7	13,9	22,5	0,86
Чародей	04	27,4	23,6	18,7	23,2	0,91
Шах	04	42,7	31,0	34,2	36,0	1,41
Среднее	-	30,2	24,9	21,6	-	-
НСР ₀₅		8,2	7,7	8,4		

Различия в погодных условиях – засушливые периоды 2022 и 2023 годы и переувлажненный 2024 год – существенно повлияли на урожайность. Среднесортная урожайность снизилась с 30,2 т/га в 2022 году до 21,6 т/га в 2024 году, что отражает чувствительность культуры к избыточной влаге. Наиболее высокую среднюю продуктивность продемонстрировали сорта Самородок (36,3 т/га) и Шах (36,0 т/га) с коэффициентами адаптивности 1,42 и 1,41 соответственно, что свидетельствует об их устойчивости к погодным колебаниям. В то же время сорта Надежда (15,0 т/га, Ka = 0,58) и Кетский (16,6 т/га, Ka = 0,63) показали минимальную в опыте урожайность и низкую адаптивность, что делает их неперспективными для региона.

Полученные данные позволяют выделить сорта, сочетающие высокую урожайность и устойчивость к погодным стрессам, что особенно важно для обеспечения стабильного производства картофеля в условиях Западной Сибири.

Среди исследованных сортов картофеля, сочетающих высокую урожайность и пригодность для переработки на чипсы, на замену сорту-стандарту Леди Клэр (средняя урожайность 27,9 т/га, оценка пригодности 9 баллов) выделены несколько перспективных вариантов. Сорт Евпатий демонстрирует близкую к стандарту урожайность (29,4 т/га) и максимальную оценку пригодности (9 баллов) благодаря низкому содержанию сахаров (0,22%) и высокому содержанию сухого вещества (25,21%), что делает его равноценной альтернативой зарубежным сортам. Сорт Артур, несмотря на более низкую среднюю урожайность (20,6 т/га), также получил 9 баллов за пригодность, обладая оптимальным

биохимическим составом (сухое вещество – 28,29%, сахара – 0,22%), и может быть рекомендован для переработки при улучшении агротехники. Сорт Надежда с урожайностью 15,0 т/га и оценкой 9 баллов (сухое вещество – 29,24%, сахара – 0,45%) уступает по продуктивности, но сохраняет высокое качество для чипсов. Эти сорта, особенно Евпатий, могут служить эффективной заменой Леди Клэр в условиях Западной Сибири, обеспечивая стабильное производство сырья для переработки.

Выводы. Наиболее перспективным отечественным аналогом сорта-стандарта Леди Клэр для переработки на чипсы в условиях Западной Сибири может служить сорт картофеля Евпатий. Он характеризуется стабильно высокой урожайностью (в среднем 29,4 т/га за 2022–2024 годы), а также повышенным коэффициентом адаптивности (Ka = 1,17), что свидетельствует о его пластичности и устойчивости к изменяющимся агрометеорологическим условиям региона.

Сорт Евпатий продемонстрировал полное соответствие требованиям перерабатывающей промышленности: содержание сухого вещества составляет 25,21%, крахмала – 12,75%, редуцирующих сахаров – 0,22% (существенно ниже чем у сорта-стандарта Леди Клэр – 0,46%). Низкая концентрация сахаров обеспечивает формирование светлой равномерной окраски ломтиков при жарке, что подтверждает высокая оценка (9 баллов) по визуальной шкале пригодности «Хантер Лаб».

Сведения о финансировании. Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (№ 25-26-20116) и Министерства науки и инновационной политики Новосибирской области (№ 30-2025-000961).

Литература

1. Семенова А. В., Морозова А. А. Оценка качественных показателей картофеля для промышленной переработки // Пищевые системы. 2021. № 4 (3S). С. 261–265. doi: 10.21323/2618-9771-2021-4-3S-261-265.
2. Гуреева Ю. А., Батов А. С. Изучение среднеспелых сортов картофеля для переработки на хрустя-

щий картофель и фри // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2023. № 11 (229). С. 55–61. doi: 10.53083/1996-4277-2023-229-11-55-61.

3. Казак А. А., Логинов Ю. П., Гайзатулин А. С. Импортзамещение в картофелеводстве Тюменской области // Агропродовольственная политика России. 2024. № 4. С. 40–49. doi: 10.35524/2227-0280_2024_04_40.

4. Seid E., Tessema L. Review on breeding potato (*Solanum tuberosum* L.) genotypes for processing quality traits // Journal of Natural Sciences Research. 2021. Vol. 12. No. 13. P. 10–19.

5. Genomics-Assisted Breeding in the CGIAR Research Program on Roots, Tubers and Bananas (RTB) / M. Friedmann, A. Asfaw, N. L. Anglin, et al. // Agriculture. 2018. Vol. 8. No. 7. P. 89. URL: <https://www.mdpi.com/20770472/8/7/89> (дата обращения: 23.01.2026). doi:10.3390/agriculture8070089.

6. Evaluation of Genetic Resources in a Potato Breeding Program for Chip Quality / R. Ruiz de Arcaute, A. Carrasco, F. Ortega, et al. // Agronomy. 2022. Vol. 12. No. 5. P. 1142. URL: <https://www.mdpi.com/20734395/12/5/1142> (дата обращения: 23.01.2026). doi:10.3390/agronomy12051142.

7. Biochemical Composition of Tubers of New Russian Potato Cultivars / A. Solovyeva, E. Rogozina, N. Chalaya, et al. // Agronomy 2024. Vol. 14. No. 4. P. 834. URL: <https://www.mdpi.com/20734395/14/4/834> (дата обращения: 23.01.2026). doi:10.3390/agronomy14040834.

8. Wang-Pruski G., Nowak J. Potato after-cooking darkening // American Journal of Potato Research. 2004. Vol. 81. P. 7–16. doi: 10.1007/BF02853831.

9. The PhysicoChemical and Sensory Characteristics of ColouredFlesh Potato Chips: Influence of Cultivar, Slice Thickness and Frying Temperature / N. Vaitkevicienė, E. Jarienė, J. Kulaitienė, et al. // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. No. 3. P. 1211. URL: <https://www.mdpi.com/20763417/12/3/1211> (дата обращения: 23.01.2026). doi:10.3390/app12031211.

10. Dry Matter, Starch Content, Reducing Sugar, Color and Crispiness Are Key Parameters of Potatoes Required for Chip Processing / M. M. Islam, S. Naznin, A. Naznin, et al. // Horticulturae. 2022. Vol. 8. No. 5. P. 362. URL: <https://www.mdpi.com/2311-7524/8/5/362> (дата обращения: 23.01.2026). doi:10.3390/horticulturae8050362.

11. Методика проведения агротехнологических опытов, учетов, наблюдений и анализов на картофеле / С.В. Жевора, Л.С. Федотова, В.И. Старовойтов и др. М.: ФГБНУ ВНИИКХ, 2019. 120 с.

12. Методы биохимического исследования растений / А. И. Ермаков, В. В. Арасимович, Н. П. Ярош и др. Л.: Агропромиздат, 1987. 143 с.

13. Hunter R.S. Measurement of Appearance: Hunter L, a, b Colour Scale. New York: John Wiley & Sons, 1987. 128 p.

14. Животков Л. А., Замотаева З. А., Секатуева Л. М. Методика выявления потенциальной продуктивности и адаптивности сортов и селекционных форм озимой пшеницы по показателю «урожайность» // Селекция и семеноводство. 1994. № 2. С. 3–6.

References

1. Semenova AV, Morozova AA. [Evaluation of quality indicators of potatoes for industrial processing]. Pishchevye sistemy. 2021; 4 (3S). 261-265 p. doi: 10.21323/2618-9771-2021-4-3S-261-265.

2. Gureeva YuA, Batov AS. [Study of mid-season potato varieties for processing into crisps and French fries]. Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2023; 11 (229). 55-61 p. doi: 10.53083/1996-4277-2023-229-11-55-61.

3. Kazak AA, Loginov YuP, Gayzatulin AS. [Import substitution in potato growing in Tyumen region]. Agroprodovol'stvennaya politika Rossii. 2024; 4. 40-49 p. doi: 10.35524/2227-0280_2024_04_40.

4. Seid E, Tessema L. Review on breeding potato (*Solanum tuberosum* L.) genotypes for processing quality traits. Journal of Natural Sciences Research. 2021; Vol.12. No.13. 10-19 p.

5. Friedmann M, Asfaw A, Anglin NL. Genomics-assisted breeding in the CGIAR research program on roots, tubers and bananas (RTB). [Internet]. Agriculture. 2018; Vol.8. No.7. 89 p. [cited 2026, January 23]. Available from: <https://www.mdpi.com/20770472/8/7/89>. doi:10.3390/agriculture8070089.

6. Ruiz de Arcaute R, Carrasco A, Ortega F. Evaluation of genetic resources in a potato breeding program for chip quality. [Internet]. Agronomy. 2022; Vol.12. No.5. 1142 p. [cited 2026, January 23]. Available from: <https://www.mdpi.com/20734395/12/5/1142>. doi:10.3390/agronomy12051142.

7. Solovyeva A, Rogozina E, Chalaya N. Biochemical composition of tubers of new Russian potato cultivars. [Internet]. Agronomy 2024; Vol.14. No.4. 834 p. [cited 2026, January 23]. Available from: <https://www.mdpi.com/20734395/14/4/834>. doi:10.3390/agronomy14040834.

8. Wang-Pruski G, Nowak J. Potato after-cooking darkening. American Journal of Potato Research. 2004; Vol.81. 7-16 p. doi: 10.1007/BF02853831.

9. Vaitkeviciene N, Jariene E, Kulaitiene J. Physico-chemical and sensory characteristics of coloured flesh potato chips: influence of cultivar, slice thickness and frying temperature. Applied Sciences. 2022; Vol.12. No.3. 1211 p. [cited 2026, January 23]. Available from: <https://www.mdpi.com/20763417/12/3/1211>. doi:10.3390/app12031211.

10. Islam MM, Naznin S, Naznin A. Dry matter, starch content, reducing sugar, color and crispiness are key parameters of potatoes required for chip processing. [Internet]. Horticulturae. 2022; Vol.8. No.5. 362 p. [cited 2026, January 23]. Available from: <https://www.mdpi.com/2311-7524/8/5/362>. doi:10.3390/horticulturae8050362.

11. Zhevora SV, Fedotova LS, Starovoytov VI. [Methodology for conducting agrotechnological experiments, records, observations and analyzes on potatoes]. Moscow: FGBNU VNIKKh. 2019; 120 p.

12. Ermakov AI, Arasimovich VV, Yarosh NP. Metody biokhimicheskogo issledovaniya rasteniy. [Methods of biochemical study of plants]. Leningrad: Agropromizdat. 1987; 143 p.

13. Hunter RS. Measurement of appearance: Hunter L, a, b Colour Scale. New York: John Wiley & Sons. 1987; 128 p.

14. Zhivotkov LA, Zamotaeva ZA, Sekatueva LM. [Methodology for identifying potential productivity and adaptability of winter wheat varieties and breeding forms based on the “yield” indicator]. Seleksiya i semenovodstvo. 1994; 2. 3-6 p.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Батов Александр Сергеевич – младший научный сотрудник сектора селекции, семеноводства и технологии возделывания картофеля Сибирского научно-исследовательского института растениеводства и селекции –

филиал Федерального исследовательского центра Института цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, (620501, Российская Федерация, Новосибирская область, Новосибирский район, рабочий посёлок Краснообск, ул. С-200, здание 21), e-mail: alexandr-batov@mail.ru, ORCID 0000-0002-6624-8178

Гуреева Юлия Александровна – младший научный сотрудник сектора селекции, семеноводства и технологии возделывания картофеля Сибирского научно-исследовательского института растениеводства и селекции – филиал Федерального исследовательского центра Института цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, (620501, Российская Федерация, Новосибирская область, Новосибирский район, рабочий посёлок Краснообск, ул. С-200, здание 21), e-mail: gureva97@yandex.ru, ORCID 0000-0003-4981-7890

Колошина Кристина Андреевна – научный сотрудник сектора селекции, семеноводства и технологии возделывания картофеля Сибирского научно-исследовательского института растениеводства и селекции – филиал Федерального исследовательского центра Института цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, (620501, Российская Федерация, Новосибирская область, Новосибирский район, рабочий посёлок Краснообск, ул. С-200, здание 21), e-mail: kristina.koloshina@yandex.ru, ORCID 0009-0006-3439-7861

Сергеева Екатерина Михайловна – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории молекулярной фитопатологии Сибирского научно-исследовательского института растениеводства и селекции – филиал Федерального исследовательского центра Института цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, (620501, Российская Федерация, Новосибирская область, Новосибирский район, рабочий посёлок Краснообск, ул. С-200, здание 21), e-mail: sergeeva@bionet.nsc.ru, ORCID 0000-0001-8234-3063

Каретников Дмитрий Игоревич – младший научный сотрудник сектора биоинформатики и информационных технологий в генетике Сибирского научно-исследовательского института растениеводства и селекции – филиал Федерального исследовательского центра Института цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, (620501, Российская Федерация, Новосибирская область, Новосибирский район, рабочий посёлок Краснообск, ул. С-200, здание 21), e-mail: karetnikovmit@bionet.nsc.ru, ORCID 0009-0003-0918-8441

Вклад авторов:

А.С. Батов – разработка концепции исследования, методология, проведение исследований, обработка данных, написание оригинального текста;

Ю.А. Гуреева – проведение исследований, формальный анализ, редактирование текста;

К.А. Колошина – проведение исследований, обработка данных, визуализация;

Е.М. Сергеева – методология, валидация результатов, научное руководство, редактирование текста;

Д.И. Каретников – формальный анализ, программное обеспечение, обработка данных.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 09.07.2025; одобрена после рецензирования 31.03.2026; принята к публикации 01.04.2026.

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

Authors:

Batov Aleksandr Sergeevich – junior researcher of Potato Breeding, Seed Production and Cultivation Technology Sector Siberian Research Institute of Plant Production and Breeding – branch of Federal Research Center, Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, (21 Building, S-200 Street, Krasnoobsk settlement, Novosibirsky District, Novosibirsk Oblast, 620501, Russian Federation), e-mail: alexandr-batov@mail.ru, ORCID 0000-0002-6624-8178

Gureeva Yuliya Aleksandrovna – junior researcher of Potato Breeding, Seed Production and Cultivation Technology Sector Siberian Research Institute of Plant Production and Breeding – branch of Federal Research Center, Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, (21 Building, S-200 Street, Krasnoobsk settlement, Novosibirsky District, Novosibirsk Oblast, 620501, Russian Federation), e-mail: gureva97@yandex.ru, ORCID 0000-0003-4981-7890

Koloshina Kristina Andreevna – researcher of Potato Breeding, Seed Production and Cultivation Technology Sector Siberian Research Institute of Plant Production and Breeding – branch of Federal Research Center, Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, (21 Building, S-200 Street, Krasnoobsk settlement, Novosibirsky District, Novosibirsk Oblast, 620501, Russian Federation), e-mail: kristina.koloshina@yandex.ru, ORCID 0009-0006-3439-7861

Sergeeva Ekaterina Mikhaylovna – Ph.D. of Biological Sciences, researcher of Molecular Phytopathology Laboratory Siberian Research Institute of Plant Production and Breeding – branch of Federal Research Center, Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, (21 Building, S-200 Street, Krasnoobsk settlement, Novosibirsky District, Novosibirsk Oblast, 620501, Russian Federation), e-mail: sergeeva@bionet.nsc.ru, ORCID 0000-0001-8234-3063

Karetnikov Dmitriy Igorevich – junior researcher of Sector of Bioinformatics and Information Technology in Genetics Siberian Research Institute of Plant Production and Breeding – branch of Federal Research Center, Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, (21 Building, S-200 Street, Krasnoobsk settlement, Novosibirsky District, Novosibirsk Oblast, 620501, Russian Federation), e-mail: karetnikovmit@bionet.nsc.ru, ORCID 0009-0003-0918-8441,

Contribution of the authors:

A.S. Batov – Conceptualization, Methodology, Investigation, Data curation, Writing – original draft;

Yu.A. Gureeva – Investigation, Formal analysis, Writing – review & Editing;

K.A. Koloshina – Investigation, Data curation, Visualization;

E.M. Sergeeva – Methodology, Validation, Supervision, Writing – review & Editing;

D.I. Karetnikov – Formal analysis, Software, Data curation.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 09.07.2025; revised 31.03.2026; accepted 01.04.2026.



ДИНАМИКА ЧИСЛЕННОСТИ МИКРООРГАНИЗМОВ РИЗОСФЕРЫ И ЭЛЕМЕНТЫ ПРОДУКТИВНОСТИ ТРИТИКАЛЕ ОЗИМОЙ (*x TRITICOSECALE WITTM. EX A. CAMUS*) ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МИКРОБНЫХ ПРЕПАРАТОВ

© 2026 Гамзаева Р. С.¹, Бекиш Л. П.² ✉

¹Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
(г. Пушкин, Российская Федерация)

²Ленинградский научно-исследовательский институт сельского хозяйства «Белогорка» –
филиал Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха
(д. Белогорка, Российская Федерация)
✉ melinda_08@mail.ru

Реферат. Освоение методов управления микробиотой для оптимизации биологической продуктивности растений – перспективное направление современного земледелия. Цель исследования – анализ изменений численности различных эколого-трофических групп микроорганизмов в ризосфере и оценка продуктивности озимой тритикале при использовании микробных препаратов. Работу выполняли в 2021–2023 годы в Ленинградской области на растениях озимой тритикале сорта Билинда. Схема опыта предполагала изучение следующих вариантов: без инокуляции (контроль), препараты Агрофил (*Agrobacterium radiobacter*, штамм 10), Мизорин (*Arthrobacter mysorens*, штамм 7), Флавобактерин (*Flavobacterium sp.*, штамм 30), Ризобакт РЖФ (*Corynebacterium sp.*, штамм ПБТ 7), МЖФ (*Enterobacter sp.*, штамм ПБТ 3), ФЖФ (*Pseudomonas sp.*, штамм ПБТ 4) и N₁₀₀. Обработку семян проводили в день посева суспензией на основе препаратов с титром 5×10⁹ КОЕ/мл и нормой 1 л на 1 т семян. Почвенные образцы отбирали из зоны ризосферы в фазы кущения, трубкования и молочной спелости. Почва опытного участка – дерново-подзолистая среднесуглинистая. Метеорологические условия в годы проведения исследований были различными по влагообеспеченности и температуре, но благоприятными для формирования и созревания зерна. Наибольшее в опыте количество аммонификаторов и актиномицетов зафиксировано при использовании Флавобактерина и Ризобакта марки ФЖФ, в то время как целлюлозоразрушающие микроорганизмы проявили активность при применении Мизорина и Ризобакта марки РЖФ. Высокая численность микроскопических грибов отмечена в вариантах с Ризобактом марок РЖФ и МЖФ. Максимальное в опыте количество фосфатмобилизующих микроорганизмов зарегистрировано в варианте с Ризобактом марки ФЖФ. Во всех вариантах отмечено увеличение общего числа олиготрофов, по сравнению с контролем. Наибольшее количество колосков, зерен и их массы зафиксировано в варианте с использованием Мизорина. Прирост к контролю составил 9,8, 27,3 и 33% соответственно.

Ключевые слова: тритикале озимая (*x Triticosecale* Wittm. ex A. Camus), микробиота, ризосфера, микробные препараты, элементы продуктивности.

Для цитирования: Гамзаева Р.С., Бекиш Л.П. Динамика численности микроорганизмов ризосферы и элементы продуктивности тритикале озимой (*x Triticosecale* Wittm. ex A. Camus) при использовании микробных препаратов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 21–28. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-21-28

RHIZOSPHERE MICROBIOLOGICAL DYNAMICS AND PRODUCTIVITY ELEMENTS OF WINTER TRITICALE (*x TRITICOSECALE WITTM. EX A. CAMUS*) USING MICROBIAL PREPARATIONS

© 2026 Gamzaeva R.S.^a, Bekish L.P.^b ✉

^aSaint Petersburg State Agrarian University
(Pushkin, Russian Federation)

^bLeningrad Research Institute of Agriculture “Belogorka” – Branch of Federal Potato Research Center named after A.G.Lorkh
(Belogorka, Russian Federation)
✉ melinda_08@mail.ru

Abstract. Development of microbiota management methods to optimize plant biological productivity is a promising area of modern agriculture. The aim of this study is to analyze changes in the number of various ecological and trophic groups of microorganisms in the rhizosphere and evaluate the productivity of winter triticales using microbial supplements. The study was conducted from 2021 to 2023 in Leningrad region on Bilinda winter triticales plants. The experimental scheme included the following options: no inoculation (control), Agrofил (*Agrobacterium radiobacter*, strain 10), Mizorin (*Arthrobacter mysorens*, strain 7), Flavobacterin (*Flavobacterium sp.*, strain 30), Rizobact RZhF (*Corynebacterium sp.*, strain PBT 7), MZhF (*Enterobacter sp.*, strain PBT 3), FZhF (*Pseudomonas sp.*, strain PBT 4), and N₁₀₀. Seed inoculation was carried out on the day of sowing with a suspension based

on preparations with a titer of 5×10^9 CFU/ml and a rate of 1 l per 1 ton of seeds. Soil samples were taken from the rhizosphere zone during tillering, booting and milky ripeness phases. The soil of experimental field was sod-podzolic medium loamy. Meteorological conditions during the study years varied in moisture and temperature, but were favorable for grain formation and maturation. The highest numbers of ammonifiers and actinomycetes were recorded with Flavobacterin and Rizobact FZhF brand, while cellulose-degrading microorganisms were active with Mizorin and Rizobact RZhF brand. High numbers of microscopic fungi were observed in the RZhF and MZhF Rizobact variants. The highest number of phosphate-mobilizing microorganisms was recorded with Rizobact FZhF. All treatments showed an increase in the total number of oligotrophs compared to the control. The highest number of spikelets, grains and their weight were observed in Mizorin treatment. The increase over the control was 9.8%, 27.3% and 33%, respectively.

Key words: winter triticale (*x Triticosecale* Wittm. ex A. Camus), microbiota, rhizosphere, microbial preparations, productivity elements

For citation: Gamzaeva RS, Bekish LP. [Rhizosphere microbiological dynamics and productivity elements of winter triticale (*x Triticosecale* Wittm. ex A. Camus) using microbial preparations]. Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2026; Vol. 21. 1(81). 21-28 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-21-28

Введение. Создание эффективных ресурсосберегающих технологий, которые способны поддерживать плодородие почвы сохранить микробное разнообразие агроэкосистем, выступает основной задачей современного земледелия [1, 2, 3]. Применение микробных препаратов на основе ассоциативных ризобактерий в технологии выращивания сельскохозяйственных растений актуально [4, 5].

Ассоциативные ризосферные бактерии фиксируют атмосферный азот, вырабатывают биологически активные вещества, способствуют увеличению устойчивости растений к различным стрессовым факторам, подавлению роста и развития фитопатогенных микроорганизмов [6, 7]. Специфика протекающих в ризосфере процессов, обусловленная составом и активностью микробиоты, играет ключевую роль в формировании продуктивного потенциала растений [4, 8]. Использование экологически безопасных агротехнологий обеспечивает рост количественного и качественного состава продукции, благодаря рациональному применению природного потенциала экосистем [9]. Состояние микробного ценоза, численность микроорганизмов и их биохимическая активность дают возможность оценить изменения условий окружающей среды, некоторые микроорганизмы выступают индикаторами состояния почв и процессов, протекающих в них [10, 11, 12].

Многие вопросы, связанные с изучением микробиологической активности прикорневой зоны тритикале, остаются в значительной степени неразрешенными. Исследование воздействия микробных препаратов, содержащих ассоциативные ризосферные бактерии, на биологическую активность корневой зоны озимой тритикале представляет собой важную задачу.

Цель исследования – анализ изменений численности различных эколого-трофических групп микроорганизмов в ризосфере, а также оценка продуктивности озимой тритикале при использовании микробных препаратов.

Условия, материалы и методы. Работу выполняли в период с 2021 по 2023 годы на опытном поле Ленинградского

НИИСХ «Белогорка» – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А. Г. Лорха». Объектом исследования служили растения озимой тритикале сорта Билинда, который допущен для возделывания в Северо-Западном регионе России.

Почва опытного поля дерново-подзолистая и среднесуглинистая. Содержание гумуса – 2,6...2,8%, подвижных P_2O_5 и K_2O по Кирсанову – соответственно 205...210 и 97...99 мг/кг, рНКС1 – 4,5...4,8.

Схема опыта: без инокуляции (контроль); Агрофил (*Agrobacterium radiobacter*, штамм 10); Мизорин (*Arthrobacter mysores*, штамм 7); Флавобактерин (*Flavobacterium sp.*, штамм 30); Ризобакт марки РЖФ (*Corynebacterium sp.*, штамм ПБТ 7); Ризобакт марки ФЖФ (*Pseudomonas sp.*, штамм ПБТ 4); Ризобакт марки МЖФ (*Enterobacter sp.*, штамм ПБТ 3); N_{100} .

Закладку опытов, отбор почвенных образцов, микробиологические анализы и статистическую обработку данных проводили по общепринятым методикам (Теннер Е. З., Шильникова В. К., Переверзева Г. И. Практикум по микробиологии. Учебное пособие для вузов. М.: Дрофа, 2004. 256 с.; Звягинцев Д. Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.; Доспехов Б. А. Методика полевого опыта: с основами статистической обработки результатов исследований. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.). Приводим средние данные за годы исследования.

Метеорологические условия в период проведения исследований были различными. Сентябрь 2021 год был суше и холоднее обычного, что компенсировалось более теплым и дождливым октябрем. В первой декаде ноября отмечено прекращение вегетации. Зима была умеренно-морозной. Возобновление вегетации отмечено 22 апреля. Май и начало июня были прохладными, с малым количеством осадков, что задержало развитие растений. Июль и начало августа в целом были благоприятными для формирования и созревания зерна.

Сентябрь 2022 год был более влажным и холоднее обычного. Прекращение вегетации отмечено 19 октября. Зима выдалась с

умеренными морозами. Вегетационный период начался 16 апреля. Вторая половина весны и начало лета отличались прохладной и сухой погодой, с возвратными заморозками. Дальнейшее развитие растений проходило при умеренно теплых условиях с небольшим количеством осадков до конца июля. Первая и вторая декады августа были теплыми и влажными, что способствовало активному наливу зерна и формированию хорошего урожая озимой тритикале.

Сентябрь 2023 год оказался теплым, температура воздуха превышала норму на 3,5°C, а количество осадков способствовало быстрому прорастанию семян и активному росту растений. Завершение вегетации зафиксировано 16 октября. Январь и февраль были в целом

умеренно морозными. Вегетация возобновилась 9 апреля. Весенне-летний период характеризовался теплой погодой. В июне и июле средняя температура воздуха была на 1,8°C выше нормы, а запасы влаги в почве до начала августа находились ниже оптимальных значений. В первой декаде августа выпало значительное количество осадков (180% от нормы), что способствовало хорошему наливу зерна.

Результаты и обсуждение. Аммонифицирующие микроорганизмы считаются индикаторными, поскольку их численность прямо зависит от количества азотсодержащих корневых выделений. Микробные препараты увеличивают численность аммонификаторов (рис. 1).

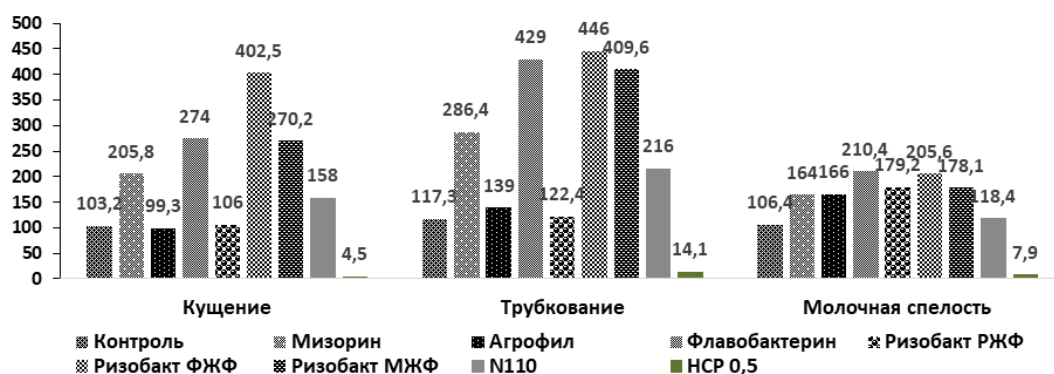


Рис. 1 – Влияние инокуляции семян на численность аммонификаторов ризосферы озимой тритикале, тыс. КОЕ/г.

Fig. 1 – The effect of seed inoculation on the abundance of ammonifying bacteria in the rhizosphere of winter triticale, thousand CFU/g.

Максимальное количество аммонификаторов отмечено в фазе трубкавания, тогда как в фазе молочной спелости их численность значительно уменьшается. В вариантах, где использовались препараты Флавобактерин и Ризобакт марки ФЖФ, уровень аммонификаторов в фазе трубкавания превышает контрольный вариант в 3,7 и 3,8 раза соответственно. Внесение минерального азота оказывало аналогичное микробным препаратам действие на динамику роста и развития аммонификаторов.

Актиномицеты – одна из самых многочисленных групп почвенных микроорганизмов. Они активизируют процесс аммонификации, разлагают углеродсодержащие соединения, а некоторые даже клетчатку. В фазе кущения происходит снижение количества актиномицетов в вариантах, обработанных биопрепаратами Мизорин и Ризобакт марки РЖФ на 7,7 и 22%, а в фазе трубкавания – на 0,6 и 8,6% соответственно, по сравнению с контролем (рис. 2).

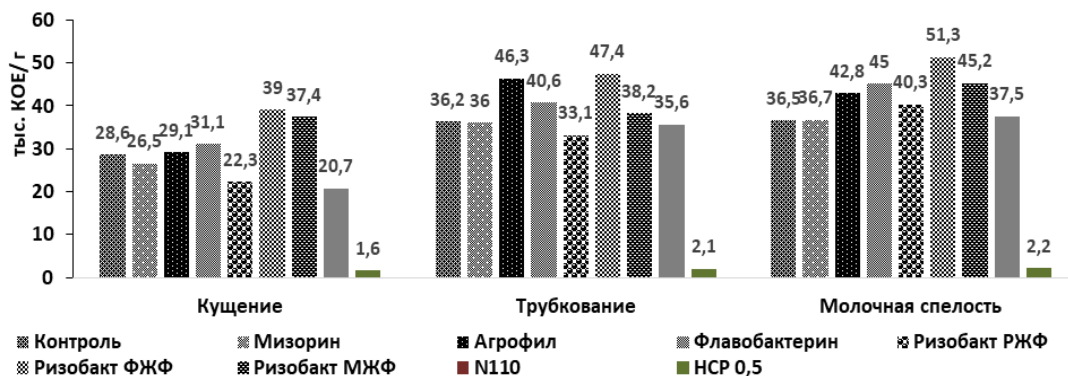


Рис. 2 – Воздействие инокуляции семян на количество актиномицетов в ризосфере озимой тритикале, тыс. КОЕ/г.

Fig. 2 – The effect of seed inoculation on the number of actinomycetes in the rhizosphere of winter triticale, thousand CFU/g.

Максимальный в опыте уровень актиномицетов выявлен на фоне использования Ризобакта марки ФЖФ и Флавобактерина в течение всех изучаемых фаз развития. При внесении минерального азота их численность снижалась относительно контроля в фазы кущения и трубкования на 30 и 1,7% соответственно, а в фазе молочной спелости уровень был выше контроля на 2,8%. Снижение численности актиномицетов на минеральном фоне, вероятно, связано с подкислением среды.

Разложение целлюлозы – ключевое звено почвообразования, определяющее формирование гумуса и структуры почвы, что обуславливает важность изучения целлюлозоразлагающих микроорганизмов.

Инокуляция семян микробными препаратами и внесение минерального азота вызвали увеличение численности целлюлозоразлагающих микроорганизмов, достигавшее максимального в опыте прироста к фазе молочной спелости (рис. 3).

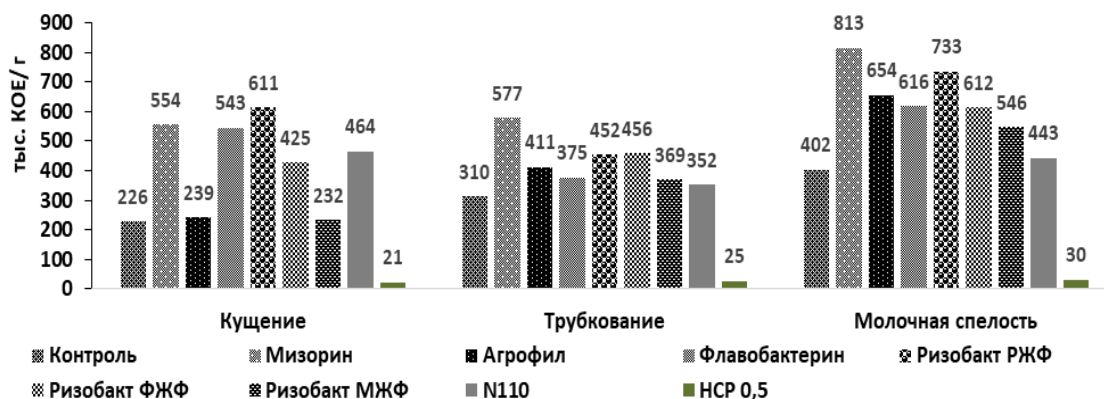


Рис. 3 – Влияние инокуляции семян на численность целлюлозоразлагающих микроорганизмов ризосферы озимой тритикале, тыс. КОЕ/г.

Fig. 3 – The effect of seed inoculation on the abundance of cellulose-degrading microorganisms in the rhizosphere of winter triticale, thousand CFU/g.

Наиболее благотворно на их рост повлияли микробные препараты Мизорин и Ризобакт марки РЖФ. В фазе молочной спелости, по сравнению с контролем, уровень их увеличения составил 102,2 и 77,3% соответственно.

Фосфатмобилизующие микроорганизмы, особенно те, что обитают в ризосфере, играют ключевую роль в преобразовании фосфорных соединений в почве. Они участвуют в

минерализации фосфорорганических веществ и способствуют превращению нерастворимых минеральных форм фосфора в растворимые. Эти микроорганизмы выступают индикаторами доступности фосфора в питании растений.

Инокуляция семян микробными препаратами оказала неоднозначное влияние на численность фосфатмобилизующих микроорганизмов (рис. 4).

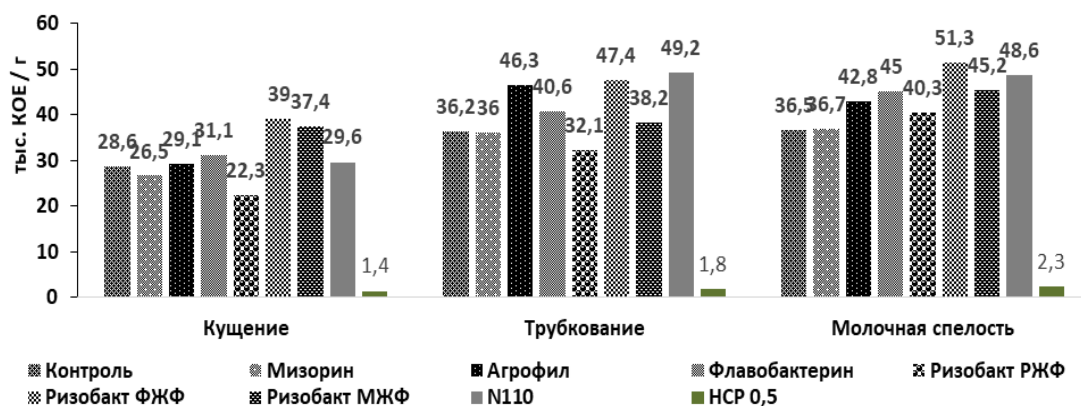


Рис. 4 – Влияние инокуляции семян на численность фосфатмобилизаторов ризосферы озимой тритикале, тыс. КОЕ/г.

Fig. 4 – The effect of seed inoculation on the abundance of phosphate-mobilizing microorganisms in the rhizosphere of winter triticale, thousand CFU/g.

Так, в фазе кущения максимальный в опыте их уровень достигнут при использовании микробных препаратов Ризобакт марки ФЖФ и марки МЖФ, а в вариантах с Агрофилом и Флавобактерином и на минеральном фоне отмечено незначительное увеличение

их численности относительно контроля. Снижение количества микроорганизмов, мобилизующих соединения фосфора, зафиксировано в вариантах с инокуляцией семян Ризобактом марки РЖФ и Мизорином в фазы кущения и трубкования относительно контроля.

В фазе молочной спелости во всех вариантах выявлено увеличение их численности, по сравнению с контролем, достигшее наивысшего в эксперименте уровня в варианте с использованием Ризобакта марки ФЖФ – 51,3 тыс. КОЕ, что соответствует приросту в 40% относительно контроля.

Микромицеты участвуют в образовании

циклических молекул меланинов, которые выступают основой для синтеза компонентов гумусовых соединений.

Применение микробных препаратов привело к росту численности микроскопических грибов. Динамика этого процесса зависела от вида препарата и фазы развития растений (рис. 5).

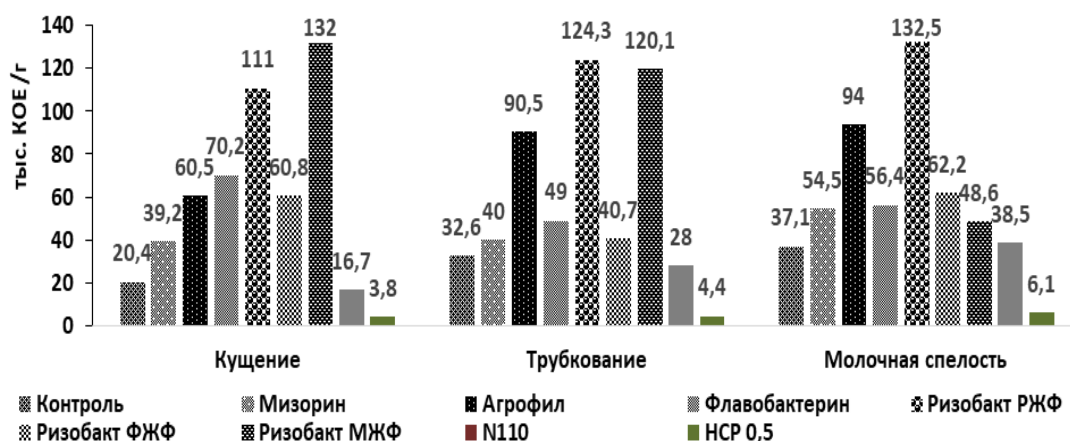


Рис. 5 – Влияние инокуляции семян на численность микромицетов ризосферы озимой тритикале, тыс. КОЕ/г.

Fig. 5 – The effect of seed inoculation on the abundance of micromycetes in the rhizosphere of winter triticale, thousand CFU/g.

Максимальная численность грибов была зафиксирована: в фазе кущения при обработке Ризобактом МЖФ и Мизорином; в фазе трубкавания при применении Агрофила; в фазе молочной спелости при использовании Флавобактерина и Ризобакта РЖФ. Внесение минерального азота во все фазы привело к снижению уровня микромицетов на 20...50%, по сравнению с вариантами применения микробных препаратов. В вариантах с обработкой Ризобактом марки РЖФ и марки МЖФ выявлено максимальное количество грибов в течение всех изученных фаз, превышавшее контрольный вариант в 4...5 раз.

Активное развитие аммонифицирующих и целлюлозолитических микроорганизмов

приводит к быстрому истощению пула легкодоступных органических соединений в ризосфере. Это создает условия для доминирования более устойчивых, сложных органических веществ. Заключительную стадию их разложения осуществляют олиготрофы, чьей ключевой особенностью выступает способность к росту при крайне низкой концентрации доступных органических субстратов. В фазе кущения общая численность олиготрофных микроорганизмов закономерно возрастает во всех вариантах, относительно контроля, достигая максимума в опыте в варианте с внесением минерального азота (3080 тыс. КОЕ/г) и резко снижается в последующие фазы (рис. 6).

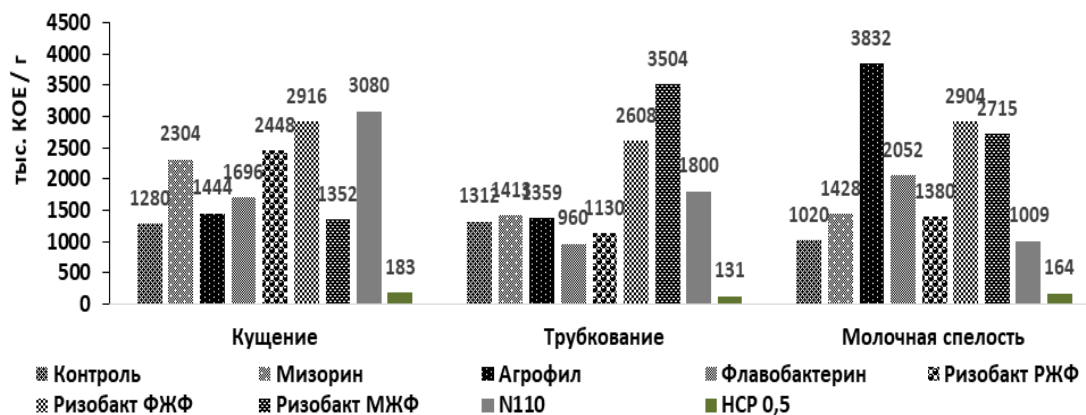


Рис. 6 – Влияние инокуляции семян на общую численность олиготрофов ризосферы озимой тритикале, тыс. КОЕ/г.

Fig. 6 – The effect of seed inoculation on the total abundance of oligotrophs in the rhizosphere of winter triticale, thousand CFU/g.

В фазе трубкования в вариантах с внесением Флавобактерина и Ризобакта марки ФЖФ численность олиготрофов была ниже контроля на 27 и 14% соответственно. Увеличение их численности в этой же фазе выявлено в варианте с Ризобактом марки МЖФ (3504 тыс. КОЕ/г), составившее 167% относительно контроля. В фазе молочной спелости происходит

незначительное увеличение численности олиготрофов во всех вариантах, за исключением варианта с внесением минерального азота.

Урожайность возделываемых культур отражает уровень эффективного плодородия почв. В нашем опыте инокуляция семян способствовала лучшему развитию растений озимой тритикале (см. табл. 1).

Таблица 1 – Влияние микробных препаратов на элементы продуктивности озимой тритикале
Table 1 – The effect of microbial preparations on productivity elements of winter triticale

Вариант	Высота, см	Длина колоса, см	Количество зерен, шт.	Масса зерна с колоса, г	Число колосков в колосе, шт.
Контроль	100,5±1,6	9,6±1,1	44,0±2,4	2,1±0,5	51,0±2,0
Мизорин	108,0±1,5	10,6±1,4	56,0±1,8	2,8±0,5	57,0±2,3
Агрофил	109,0±1,8	9,6±0,8	50,0±1,4	2,7±0,4	54,0±1,8
Флавобактерин	106,1±1,3	10,2±1,4	53,0±2,0	2,4±0,7	53,0±1,6
Ризобакт РЖФ	106,9±2,2	9,1±1,6	49,0±1,6	2,7±0,3	54,0±1,5
Ризобакт ФЖФ	106,2±1,8	9,8±0,9	50,0±1,9	2,4±0,8	55,0±2,1
Ризобакт МЖФ	99,2±1,7	9,6±0,8	41,0±2,3	2,1±0,5	52,0±1,9
N ₁₀₀	104,6±1,8	9,7±0,9	43,0±2,4	2,1±0,4	51,0±2,2
НСР ₀₅	4,2	1,1	3,6	0,1	3,1

Высота растения увеличивалась на 5,6...8,5% относительно контроля в зависимости от вида применяемого препарата, на минеральном фоне – на 4,1%. Высота растений ниже контрольного уровня зафиксирована только в варианте с использованием Ризобакта марки МЖФ, составившая 99,2 см. По длине колоса значительных различий между вариантами не обнаружено. Наивысшая в опыте величина этого показателя зафиксирована при применении Мизорина и составила 10,6 см, что на 10,4% больше, по сравнению с контролем. Также наибольшие значения количества колосков, зерен и массы зерна с колоса отмечены в варианте с Мизорином, прирост которых к контролю составил 27,3, 33,0 и 9,8% соответственно.

Выводы. При использовании изучаемых препаратов наибольшее в опыте количество аммонификаторов и актиномицетов зафиксировано в вариантах с Флавобактерином и Ризобактом марки ФЖФ. Увеличение численности целлюлозоразрушающих микроорганизмов обеспечивало применение Мизорина и Ризобакта марки РЖФ. В фазе

молочной спелости во всех вариантах отмечено увеличение численности фосфатмобилизирующих микроорганизмов, по сравнению с контролем, причем максимальным в опыте оно было при использовании Ризобакта марки ФЖФ (51,5 тыс. КОЕ), где величина этого показателя превышала контроль на 40%.

В вариантах с Ризобактом марок РЖФ и МЖФ зафиксирован самый высокий уровень численности грибов. Увеличение общего количества олиготрофных микроорганизмов относительно контроля наблюдали при использовании всех изучаемых препаратов. Максимальный в опыте прирост их численности выявлен на минеральном фоне в фазе кущения.

Увеличение высоты растений, по сравнению с контролем, при применении микробных препаратов варьировало от 5,6 до 8,5%, против 4,1% на минеральном фоне. Наибольшее количество колосков, зерен и массы зерна с колоса отмечали в варианте с Мизорином, прирост, по отношению к контролю, составил 27,3, 33,0 и 9,8% соответственно.

Литература

- 1.Завалин А. А., Алферов А. А., Чернова Л. С. Ассоциативная азотфиксация и практика применения биопрепаратов в посевах сельскохозяйственных культур // Агрохимия. 2019. № 8. С. 83–96. doi: 10.1134/S0002188119080143.
- 2.Завалин А. А., Свиридова Л. А. Роль биологического азота в земледелии России // Агрохимия. 2024. № 8. С. 3–8. doi: 10.31857/S0002188124080019.
- 3.Емцев В. Т., Мишустин Е. Н. Микробиология. М.: Дрофа, 2005. 328 с.
- 4.Чеве́рдин А. Ю. Растительно-микробное взаимодействие ассоциативных диатрофов в посевах озимой пшеницы Центрального Черноземья // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2024. № 112. С. 187–192. doi: 10.21515/1999-1703-112-187-192.
- 5.Gamzaeva R. S., Bekish L. P. The influence of microbial preparations on the biological activity of the rhizosphere and the productivity of winter triticale // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 480. Art. 03022. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2024/10/e3sconf_eea2023_03022.pdf (дата обращения: 20.08.2025). doi: 10.1051/e3sconf/202448003022.

- 6.Хамова О. Ф. Эффективность применения биопрепаратов ассоциативной азотфиксации в ресурсосберегающих технологиях // *Агрохимия*. 2022. № 9. С. 47–52. doi: 10.31857/s0002188122090083.
- 7.Божко А. А. Биологическая активность почвы ризосферы овса посевного (*Hordeum vulgare* L.) при инокуляции семян ассоциативными диазотрофами // *Проблемы агрохимии и экологии*. 2019. № 2. С. 60–64. doi: 10.26178/AE.2019.15.54.010.
- 8.Impact of water stress on microbial community and activity in sandy and loamy soils / S. Siebielec, G. Siebielec, A. Klimkowicz-Pawlas, et al. // *Agronomy*. 2020. Vol. 10. No. 9. P. 1–17. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/9/1429> (дата обращения: 20.08.2025). doi: 10.3390/agronomy10091429.
- 9.Biological activity and functional diversity in soil in different cultivation systems / S. Jezierska-Tys, S. Wesolowska, A. Galazka, et al. // *International journal of Environmental Science and Technology*. 2020. Vol. 17. No. 10. P. 4189–4204. doi: 10.1007/s13762-020-02762-5.
- 10.Взаимосвязь состава корневых экссудатов и эффективности взаимодействия растений пшеницы с микроорганизмами / А. И. Шапошников, А. А. Белимов, Т. С. Азарова и др. // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2023. Т. 59. № 3. С. 260–274. doi: 10.31857/S0555109923030170.
- 11.Malynovska I. M. Irection and strength of microbiological processes in layers of gray forest soil under different regimes of management // *Biotechnologia Acta*. 2019. Vol. 12. No. 6. P. 65–70. doi: 10.15407/biotech12.06.065.
- 12.Киселева А. А., Шулико Н. Н. Влияние ассоциативных диазотрофов на численность целлюлозоразлагающих микроорганизмов в ризосфере яровой мягкой пшеницы // *Здоровые почвы – гарант устойчивого развития. Сборник материалов VII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 90-летию Курского государственного университета и 30-летию кафедры биологии и экологии*. Курск, 2024. С. 19–20.

References

1. Zavalin AA, Alferov AA, Chernova LS. [Associative nitrogen fixation and the practice of using biopreparations in agricultural crops]. *Agrokhimiya*. 2019; 8. 83–96 p. doi: 10.1134/S0002188119080143.
2. Zavalin AA, Sviridova LA. [Role of biological nitrogen in agriculture in Russia]. *Agrokhimiya*. 2024; 8. 3–8 p. doi: 10.31857/S0002188124080019.
3. Emtsev VT, Mishustin EN. *Mikrobiologiya*. [Microbiology]. Moscow: Drofa. 2005; 328 p.
4. Cheverdin AYU. [Plant-microbial interaction of associative diazotrophs in winter wheat crops of Central Black Earth region]. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2024; 112. 187–192 p. doi: 10.21515/1999-1703-112-187-1927.
5. Gamzaeva RS, Bekish LP. The influence of microbial preparations on the biological activity of the rhizosphere and the productivity of winter triticale. [Internet]. *E3S Web of Conferences*. 2024; Vol.480. Art. 03022 p. [cited 2025, August 20]. Available from: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2024/10/e3sconf_eea2023_03022.pdf. doi: 10.1051/e3sconf/202448003022.
6. Khamova OF. [Efficiency of using associative nitrogen fixation biopreparations in resource-saving technologies]. *Agrokhimiya*. 2022; 9. 47–52 p. doi: 10.31857/s0002188122090083.
7. Bozhko AA. [Biological activity of oat (*Hordeum vulgare* L.) rhizosphere soil after seed inoculation with associative diazotrophs]. *Problemy agrokhimii i ekologii*. 2019; 2. 60–64 p. doi: 10.26178/AE.2019.15.54.010.
8. Siebielec S, Siebielec G, Klimkowicz-Pawlas A. Impact of water stress on microbial community and activity in sandy and loamy soils. [Internet]. *Agronomy*. 2020; Vol.10. No.9. 1–17 p. [cited 2025, August 20]. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4395/10/9/1429>. doi: 10.3390/agronomy10091429.
9. Jezierska-Tys S, Wesolowska S, Galazka A. Biological activity and functional diversity in soil in different cultivation systems. *International journal of Environmental Science and Technology*. 2020; Vol.17. No.10. 4189–4204 p. doi: 10.1007/s13762-020-02762-5.
10. Shaposhnikov AI, Belimov AA, Azarova TS. [Relationship between the composition of root exudates and the efficiency of interaction of wheat plants with microorganisms]. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*. 2023; Vol.59. 3. 260–274 p. doi: 10.31857/S0555109923030170.
11. Malinovskaya IM. Irection and strength of microbiological processes in layers of gray forest soil under different regimes of management. *Biotechnologia Acta*. 2019; Vol.12. No.6. 65–70 p. doi: 10.15407/biotech12.06.065.
12. Kiseleva AA, Shuliko NN. [Impact of associative diazotrophs on number of cellulose-decomposing microorganisms in the rhizosphere of spring soft wheat. Healthy soil – a guarantor of sustainable development]. *Sbornik materialov VII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 90-letiyu Kurskogo gosudarstvennogo universiteta i 30-letiyu kafedry biologii i ekologii*. Kursk. 2024; 19–20 p.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Гамзаева Рафина Саидметовна – кандидат биологических наук, доцент кафедры почвоведения и агрохимии Санкт-Петербургского государственного аграрного университета (196601, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, г Пушкин, ш. Петербургское, д. 2, литера а), e-mail: r.gamzaeva@yandex.ru, ORCID 0000-0003-4079-1815

Бекиш Любовь Петровна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник отдела селекции и семеноводства зерновых, зернобобовых культур, многолетних трав и рапса Ленинградский научно-исследовательский институт сельского хозяйства «Белогорка» – филиал Федерального исследовательского центра картофеля имени А. Г. Лорха, (188338, Российская Федерация, Ленинградская область, р-н Гатчинский, д. Белогорка, ул. Институтская, д.1), e-mail: melinda_08@mail.ru, ORCID 0000-0001-6777-309X

Вклад авторов:

Р.С. Гамзаева, Л.П. Бекиш – разработка концепции и методологии исследования, проведение экспериментальных работ, анализ и интерпретация данных, написание и редактирование текста, финальное утверждение рукописи. Вклад авторов равнозначный.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 20.02.2025; одобрена после рецензирования 31.03.2026; принята к публикации 01.04.2026.

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

Authors:

Gamzaeva Rafina Saidmetovna – Ph.D. of Biological Sciences, Associate Professor of Soil Science and Agrochemistry Department Saint Petersburg State Agrarian University (Peterburgskoe Shosse, 2, litera A, Pushkin, Saint Petersburg, 196601, Russian Federation), e-mail: r.gamzaeva@yandex.ru, ORCID 0000-0003-4079-1815

Bekish Lyubov Petrovna – Ph.D. of Biological Sciences, leading researcher of Department of Breeding and Seed Production of grain, legume crops, perennial grasses and rapeseed Leningrad Research Institute of Agriculture “Belogorka” – Branch of Federal Potato Research Center named after A.G.Lorkh (1 Institutskaya Street, Belogorka Village, Gatchinsky District, Leningrad Region, 188338, Russian Federation), e-mail: melinda_08@mail.ru, ORCID 0000-0001-6777-309X

Contribution of the authors:

R.S. Gamzaeva, L.P. Bekish — development of the research concept and methodology, conducting experimental work, data analysis and interpretation, writing and editing the text, final approval of the manuscript. The authors' contributions are equal.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 20.02.2025; revised 31.03.2026; accepted 01.04.2026.



ТЕМПЕРАТУРА И ВЛАЖНОСТЬ ПОЧВЫ КАК ФАКТОРЫ СКОРОСТИ ЭМИССИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ПРИ ВНЕСЕНИИ ВОЗРАСТАЮЩИХ ДОЗ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ В ПОСЕВАХ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ

© 2026 Дёмин Е. А. ✉, Ахтямова А. А.

*Тюменский государственный университет**(г. Тюмень, Российская Федерация)*

✉ gambitn2013@yandex.ru

Реферат. Пахотные почвы – один из основных источников поступления углекислого газа в атмосферу. Повышение химической нагрузки, особенно применение высоких доз минеральных удобрений, увеличивает дыхание почвы. Для прогнозирования общих потоков эмиссии диоксида углерода в агроэкосистемах необходимо определение влияния различных факторов на скорость продуцирования углекислого газа. Цель исследования – установить влияние температуры и влажности почвы на интенсивность эмиссии диоксида углерода в посевах яровой пшеницы при внесении возрастающих доз минеральных удобрений в условиях лесостепной зоны Зауралья. Работу выполняли в 2023–2024 годы на черноземе выщелоченном. Схема опыта включала варианты с естественным уровнем питания (без удобрений) и дозами минеральных удобрений на расчетную урожайность 3,0...6,0 т/га зерна яровой пшеницы. Эмиссию диоксида углерода определяли с использованием газоанализаторов с закрытыми камерами. Дыхание почвы в варианте без использования удобрений находилось в интервале от 12 до 113 кг/га в сутки. При их внесении продуцирование CO₂ составляло от 13 до 174 кг/га в сутки. Вне зависимости от уровня питания отмечена сильная связь дыхания почвы с ее температурой ($r=0,79...0,87$) и средняя – с влажностью ($r=0,63...0,69$). Изменение температуры почвы на 1°C без применения удобрений приводило к варьированию эмиссии CO₂ в сутки на 7,7 кг/га, с повышением уровня питания его диапазон увеличивался до $\pm 9,1...13,0$ кг/га в сутки. Изменение влажности почвы на 1% сопровождалось варьированием эмиссии в сутки соответственно на 2,4 кг CO₂/га и 3,2...3,9 кг CO₂/га.

Ключевые слова: углекислый газ, дыхание почвы, продуцирование диоксида углерода, уровень питания, корреляция, уравнения регрессии.

Для цитирования: Дёмин Е.А., Ахтямова А.А. Температура и влажность почвы как факторы скорости эмиссии диоксида углерода при внесении возрастающих доз минеральных удобрений в посевах яровой пшеницы // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 29-36. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-29-36

SOIL TEMPERATURE AND MOISTURE AS FACTORS OF CARBON DIOXIDE EMISSION RATES WHEN INCREASING DOSES OF MINERAL FERTILIZERS IN SPRING WHEAT CROPS

© 2026 Demin E.A. ✉, Akhtyamova A.A.

*Tyumen State University**(Tyumen, Russian Federation)*

✉ gambitn2013@yandex.ru

Abstract. Arable soils are one of the main sources of carbon dioxide emissions into the atmosphere. Increasing chemical loads, especially the application of high doses of mineral fertilizers, increase soil respiration. It is necessary to determine the influence of various factors on the rate of carbon dioxide production in order to predict overall carbon dioxide emission fluxes in agroecosystems. The aim of this study was to determine the influence of soil temperature and moisture on intensity of carbon dioxide emissions in spring wheat crops with increasing doses of mineral fertilizers in the forest-steppe zone of Trans-Urals. The work was carried out in 2023-2024 years on leached chernozem. The experimental scheme included variants with a natural nutrient level (without fertilizers) and doses of mineral fertilizers for an estimated yield of 3.0...6.0 t/ha of spring wheat grain. Carbon dioxide emissions were determined using closed-chamber gas analyzers. Soil respiration in the variant without fertilizers ranged from 12 to 113 kg/ha per day. In the fertilized variants CO₂ production ranged from 13 to 174 kg/ha per day. A strong relationship was observed between soil respiration and its temperature ($r=0.79...0.87$) and a moderate relationship with moisture ($r=0.63...0.69$) regardless of the nutrient level. A change in soil temperature by 1°C without fertilizers led to a variation in CO₂ emissions per day by 7.7 kg/ha, its range increased to $\pm 9.1...13.0$ kg/ha per day with an increase in the nutrient level. A change in soil moisture by 1% was accompanied by a daily variation in emissions of 2.4 kg CO₂/ha and 3.2-3.9 kg CO₂/ha, respectively.

Key words: carbon dioxide, soil respiration, carbon dioxide production, nutrient status, correlation, regression equations.

For citation: Demin EA, Akhtyamova AA. [Soil temperature and moisture as factors of carbon dioxide emission rates when increasing doses of mineral fertilizers in spring wheat crops]. Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2026; Vol. 21. 1(81). 29-36 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-29-36

Введение. Последнее столетие насыщено множеством проблем, одна из которых – глобальное изменение климата, по последним данным в 2024 году отмечено повышение средней температуры воздуха на земле на $1,5^{\circ}\text{C}$ [1, 2]. Это происходит по причине увеличения массовой концентрации парниковых газов и в частности диоксида углерода, который накапливается в нижних слоях атмосферы [3]. Повышение содержания климатически активных газов в атмосфере связано с увеличением интенсивности технологических процессов во всех отраслях. Одним из главных источников парниковых газов выступают высокотехнологические перерабатывающие предприятия, добывающие углеводородное сырье, а также агропромышленный комплекс [4, 5]. На долю последнего, по некоторым данным, приходится около 25% всех выбросов парниковых газов, связанных с деятельностью человека, и половина из них представлена диоксидом углерода и закисью азота [6]. Это связано с тем, что при постоянном воздействии на почву сельскохозяйственными орудиями происходит разрыхление обрабатываемого слоя, улучшается аэрация, усиливается развитие почвенной аэробной микрофлоры и ускоряется процесс минерализации органического вещества почвы, одним из конечных продуктов распада которого служит диоксид углерода [7, 8].

Введение целинных почв в сельскохозяйственный оборот служит дополнительным фактором, влияющим на баланс углерода в агроэкосистемах, который связан с тем, что в отличие от естественных луговых экосистем, в почву под культурными видами возвращается намного меньше органического углерода с растительными остатками. Этот факт обусловлен тем, что биомасса корней луговых естественных экосистем в разы больше, чем в зерновых агроценозах. Дополнительная причина связана с агротехникой, а именно возделыванием кормовых культур для получения зеленой массы, что приводит к дефициту растительных остатков и углерода, поступающих в почву [9]. Это служит причиной того, что источником питания для почвенной микробной массы становятся не только свежие растительные остатки, но и стабильные гумусовые вещества почвы [10]. Важным фактором, который оказывает стимулирующее действие на прирост биомассы растений, а также активность почвенной микробиоты, выступают минеральные удобрения. Средние дозы минеральных удобрений оказывают стимулирующее действие на микробную массу почвы и служат катализатором их активности, что приводит к ускорению процессов трансформации органического вещества в минеральные соединения и увеличивает скорость эмиссии диоксида углерода [11].

Одними из наиболее важных абиотических факторов, оказывающих влияние на интенсивность биохимических процессов,

протекающих в почве, выступают гидротермические условия, а именно температура и влажность почвы, которые напрямую связаны с погодными условиями. Во многих работах отмечена сильная прямая связь между температурой почвы и скоростью эмиссии диоксида углерода [12, 13]. Реже авторы отмечают корреляцию средней силы между влажностью и дыханием почвы [14, 15]. В связи с вышеперечисленным, изучение влияния гидротермических условий на скорость эмиссии диоксида углерода на фоне использования высоких доз минеральных удобрений в современном сельском хозяйстве необходимо.

Цель исследования – установить влияние температуры и влажности почвы на интенсивность эмиссии диоксида углерода в посевах яровой пшеницы при внесении возрастающих доз минеральных удобрений в условиях лесостепной зоны Зауралья.

Условия, материалы и методы. Работу выполняли в зернопаровом севообороте в 2023–2024 годы в северной лесостепи Тюменской области. Почвенный покров участка представлен черноземом выщелоченным. Массовая доля органического вещества составляла – $4,0 \pm 0,8\%$; кислотность обменная $5,5 \pm 0,3$ ед. pH; содержание азота нитратного – $9,1 \pm 5,4$ мг/кг; подвижного фосфора и калия по Чирикову – 71 ± 20 мг/кг и 146 ± 38 мг/кг соответственно.

Исследование проводили в многолетнем агрохимическом, стационарном полевом опыте, где ежегодно с 1995 года под яровую пшеницу и овес вносили рассчитанные методом элементарного баланса дозы минеральных удобрений на планируемую урожайность 3,0, 4,0, 5,0 и 6,0 т/га зерна, под однолетние травы удобрения не вносили. За контроль был взят участок без применения удобрений. Виды агротехнических работы были идентичными в течение всего времени проведения эксперимента. Ежегодно после уборки однолетних трав проводили вспашку на глубину 20...22 см, весной – боронование, врезание удобрений СЗП-3,6 на глубину 4...6 см, культивацию и посев яровой пшеницы с нормой высева 6,0 млн всхожих семян на 1 га с последующим прикатыванием. В 2023 году вносили следующие дозы минеральных удобрений: в расчете на урожай 3,0 т/га – $\text{N}_{95}\text{P}_{46}$; 4,0 т/га – $\text{N}_{153}\text{P}_{94}$; 5,0 т/га – $\text{N}_{211}\text{P}_{142}$ и 6,0 т/га – $\text{N}_{270}\text{P}_{190}$, а в 2024 году: 3,0 т/га – $\text{N}_{60}\text{P}_{40}$; 4,0 т/га – $\text{N}_{120}\text{P}_{80}$; 5,0 т/га – $\text{N}_{180}\text{P}_{120}$ и 6,0 т/га – $\text{N}_{240}\text{P}_{160}$. В качестве удобрений применяли аммиачную селитру (N_{34}) и аммофос ($\text{N}_{12}\text{P}_{52}$). Потребность во внесении калийных удобрений отсутствовала вследствие его высокого содержания в почве.

Дыхание почвы определяли в трехкратном повторении камерным методом с применением инфракрасных газовых анализаторов, в 2023 году прибором AZ77535 в 2024 году – PriEco PRI-8610. В период замеров в трехкратном повторении, определяли температуру почвы в слое 0...30 см электронным почвенным

термометром и отбирали почву в бюксы послойно через каждые 10 см до глубины 0...30 см, влажность почвы устанавливали в лаборатории гравиметрическим методом.

Погодные условия 2023–2024 годы были различными. В 2023 году они характеризовались как умеренно теплые и увлажненные, гидротермический коэффициент (ГТК) достигал 1,0 ед. Распределение осадков было

следующим: избыток отмечали в середине и конце лета, дефицит – в мае и сентябре (рис. 1). Температура воздуха при этом была выше нормы на протяжении всей вегетации. В 2024 году ГТК составлял 1,4 ед., избыток осадков был в начале и конце лета, недостатка влаги при этом не отмечали, а температура воздуха с июня по октябрь была выше средних многолетних значений.

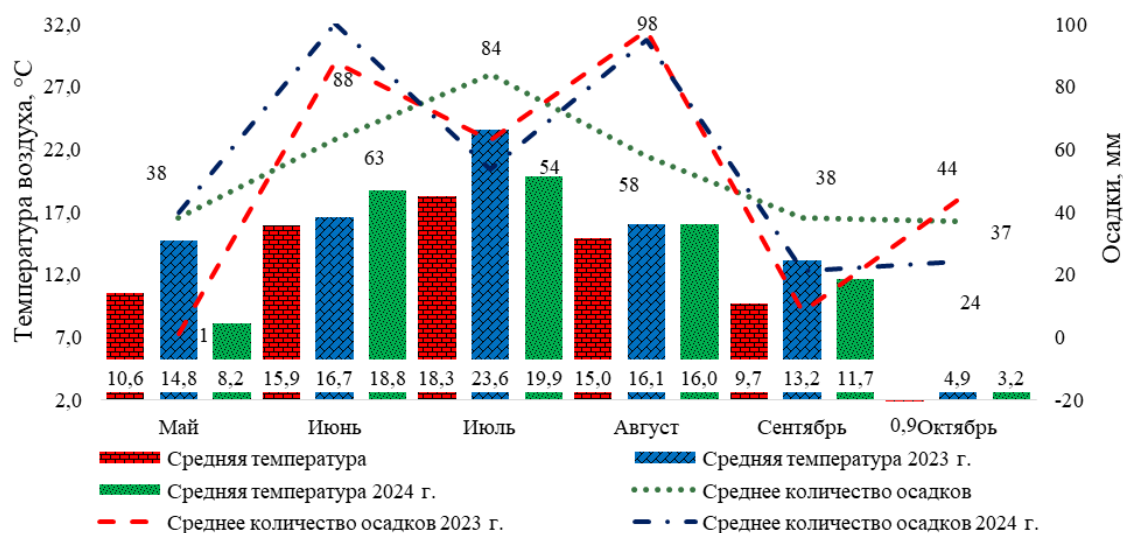


Рис. 1 – Погодные условия периода исследований
Fig. 1 – Weather conditions during the research period

Результаты и обсуждение. В мае почва прогревалась до оптимальных значений в 10,5°C независимо от уровня минерального питания (табл. 1). В июле средняя температура почвы за месяц в контроле составляла 16,5°C, что на 6,0°C выше, чем в мае. Достоверных различий в температуре почвы при этом с удобренными вариантами не отмечали, отклонения находились в пределах ошибки исследования. Прогрев почвы в начале лета связан с закономерным повышением температуры воздуха и более активной солнечной радиацией, которая в связи с тем, что растения не до конца затеняют поверхность почвы, оказывает существенное влияние на температурный режим. К июлю средняя за месяц температура почвы продолжала повышаться в контроле до 19,7°C, что на 3,2°C выше значений предыдущего месяца, и достигала пиковых значений за

вегетацию. В удобренных вариантах, несмотря на то, что температура почвы также повышалась относительно прошлого месяца, относительно контроля почва была прогрета меньше на 0,5...0,8°C. Причем с повышением доз удобрений отмечали более существенные различия с контролем в температуре почвы. Это связано с тем, что в более удобренных вариантах больше биомасса растений, что приводит к существенному затенению и снижает влияние солнечной радиации на прогрев почвы. В августе ее температура начинала опускаться до 16,7...16,9°C, что на 2,1...2,8°C ниже значений прошлого месяца. Начиная с августа и до октября, существенных различий в температуре почвы между опытными вариантами не выявлено, отклонения были в пределах ошибки исследования. В сентябре средняя температура почвы опускалась до значений 12,5...12,6°C, а в октябре до 8,1...8,2°C.

Таблица 1 – Температура почвы в слое 0...30 см под посевами яровой пшеницы при внесении возрастающих доз минеральных удобрений (2023–2024 годы), °C

Table 1 – Soil temperature in the 0–30 cm layer under spring wheat crops with increasing doses of mineral fertilizers (2023–2024), °C

Вариант	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Контроль	10,5	16,5	19,7	16,9	12,5	8,2
NP на 3,0 т/га	10,5	16,4	19,2	16,9	12,6	8,1
NP на 4,0 т/га	10,5	16,4	19,0	16,7	12,5	8,1
NP на 5,0 т/га	10,5	16,3	18,9	16,9	12,6	8,1
NP на 6,0 т/га	10,5	16,2	18,9	16,8	12,5	8,1
HCP ₀₅	0,2	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2

Влажность почвы в течение вегетации варьировала из-за изменения режима увлажнения и не зависела от уровня минерального питания. С мая по октябрь достоверных

различий между вариантами в зависимости от доз удобрений не отмечено, хотя влажность почвы варьировала от 17,4 до 30,1% (табл. 2).

Таблица 2 – Влажность почвы в слое 0...30 см под посевами яровой пшеницы при внесении возрастающих доз минеральных удобрений (2023–2024 годы), %

Table 2 — Soil moisture in the 0–30 cm layer under spring wheat crops with increasing doses of mineral fertilizers (2023–2024), %

Вариант	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Контроль	24,7	27,6	29,8	22,3	22,3	17,4
NP на 3,0 т/га	24,0	26,5	30,1	22,3	22,6	17,9
NP на 4,0 т/га	24,3	27,4	29,9	22,6	22,7	17,5
NP на 5,0 т/га	24,8	26,8	29,9	22,9	22,5	17,7
NP на 6,0 т/га	24,6	26,6	29,9	23,2	22,7	17,6
HCP ₀₅	1,0	1,4	1,9	1,6	1,3	1,2

Интенсивность эмиссии диоксида углерода в агроэкосистемах зависит от нескольких переменных, таких как обработки почвы, виды возделываемых культур, химическая нагрузка и др. [16, 17]. Подавляющее большинство исследователей отмечают, что минеральные удобрения выступают своего рода катализатором эмиссии диоксида углерода по причине активизации активности почвенной микробиоты [18, 19, 20].

В мае в среднем за годы исследований в варианте без использования удобрений эмиссия диоксида углерода достигала 43,3 кг/га в сутки (табл. 3). Внесение удобрений для получения планируемой урожайности на уровне 3,0...6,0 т/га приводило к повышению интенсивности почвенного дыхания. В вариантах с NP на 3,0 и 4,0 т/га зерна эмиссия в мае возрастала относительно контроля на 2,8 и 4,2 кгCO₂/га в сутки (HCP₀₅=2,1 кгCO₂/га в сутки), что соответствовало 6 и 10% соответственно. В вариантах с NP на 5,0 и 6,0 т/га зерна интенсивность процесса дыхания почвы была выше контроля на 12,9...5,9 кг/га в сутки (30 и 37%).

В начале лета дыхание почвы увеличивалось более чем вдвое вне зависимости от уровня минерального питания. В контроле дыхание почвы в среднем за месяц составляло 82,5 кгCO₂/га в сутки. В удобренных вариантах с повышением уровня питания продуцирование CO₂ увеличивалось и было больше чем в контроле на 18,4...51,4 кгCO₂/га в сутки (22...62%).

В середине лета (июле) дыхание почвы в естественном по питанию варианте возросло на 37% (30,5 кгCO₂/га в сутки) относительно весенних значений. В вариантах с применением дополнительного минерального питания эмиссия CO₂, так же, как и в контроле, увеличивалась более чем на 25...30%. Относительно контроля продуцирование углерода с повышением уровня минерального питания увеличивалось на 12...54% (13,5...60,6 кгCO₂/га в сутки). Отмеченная в опыте максимальная эмиссия в июле может быть связана с тем, что в этот период времени складывались наиболее

благоприятные за вегетацию температурный (18,9...19,7°C) и водный (29,9...30,1%) режимы почвы для развития аэробной аборигенной почвенной микрофлоры, которая активно участвует в протекающих в почве биогеохимических процессах [21, 22]. Не исключая себя фактор, который также дает определённую долю вклада в общую эмиссию CO₂ – это корневая система, которая к середине лета хорошо разрастается в почве.

С августа и до конца вегетации, отмечено снижение эмиссии диоксида углерода. Это происходило по причине улучшения условий для развития микробной массы, в результате понижения температуры почвы. Важным фактором уменьшения дыхания почвы становится то, что корневая система растений начинает снижать свой вклад в общую эмиссию углерода в агроэкосистемах по причине созревания яровой пшеницы. Возможным фактором, который приводит к уменьшению скорости дыхания почвы с августа, может выступать то, что микробиота почвы переработала органические остатки побочной продукции, оставленной на поле с прошлого года, что приводит к сокращению микробной массы почвы. В контроле эмиссия диоксида углерода составила 82,0 кгCO₂/га в сутки, что на 27% (31,0 кгCO₂/га в сутки) меньше, чем в предыдущем месяце. В удобренных вариантах снижение июльского максимума составляло 20...24% (29,3...36,6 кгCO₂/га в сутки). В варианте с NP на 3,0 и 4,0 т/га зерна эмиссия сократилась до 95,7...109,1 кгCO₂/га в сутки, однако была выше контрольного варианта на 17...33% (13,7...27,1 кгCO₂/га в сутки). В более удобренных вариантах с NP на 5,0 и 6,0 т/га зерна эмиссия была выше контроля на 57...67% (46,9...55,0 кгCO₂/га в сутки).

В сентябре средняя эмиссия диоксида углерода в сутки уменьшилась более чем в два раза до 40,2 кгCO₂/га в сутки. В удобренных вариантах снижение скорости эмиссии относительно прошлого месяца было менее выражено в варианте с NP на 3,0 и 4,0 т/га зерна, снижение дыхание относительно августа составляло не более 38 и 42%

(36,6 и 46,4 кгСО₂/га в сутки) на более высоких питательных фонах (на 5,0 и 6,0 т/га зерна) – 40 и 28% (51,4 и 48,7 кгСО₂/га в сутки) соответственно. Относительно естественного уровня питания дыхание почвы в удобренных вариантах с повышением расчетных доз было выше на 47...120%.

В октябре во всех исследуемых вариантах отмечали минимальное дыхание почвы, которое относительно сентября снижалось в 3...4 раза и достигало в контроле 12,6 кгСО₂/га в сутки. В вариантах с NP на 3,0 и 4,0 т/га зерна из-за хорошего усвоения питательных веществ из почвы яровой пшеницей, питательный режим становился

схожим с контролем. Это приводило к тому, что дыхание почвы существенно не отличалось от контроля из-за отсутствия катализатора для почвенной микробиоты в виде свободных форм азота. В вариантах с NP на 5,0 и 6,0 т/га зерна, из-за неполучения запланированного урожая по причине особенностей погодных условий, в почве остаются неизрасходованные минеральные формы питательных веществ, что увеличивает активность и численность микробной массы почвы. Это приводит к тому, что дыхание почвы, относительно контроля, в этих вариантах было выше на 35 и 56% (4,4 и 7,1 кгСО₂/га в сутки).

Таблица 3 – Эмиссия диоксида углерода под посевами яровой пшеницы при внесении возрастающих доз минеральных удобрений (2023–2024 годы), кг/га в сутки

Table 3 – Carbon dioxide emission under spring wheat crops with increasing doses of mineral fertilizers (2023–2024), kg/ha per day

Вариант	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Контроль	43,3	82,5	113,0	82,0	40,2	12,6
NP на 3,0 т/га	46,1	100,9	126,5	95,7	59,1	13,1
NP на 4,0 т/га	47,5	109,2	138,4	109,1	62,7	13,8
NP на 5,0 т/га	56,2	131,8	165,2	128,9	77,5	17,0
NP на 6,0 т/га	59,2	133,9	173,6	137,0	88,3	19,7
НСР ₀₅	2,1	7,5	12,3	10,2	7,3	1,8

Вне зависимости от доз минеральных удобрений корреляция между эмиссией диоксида углерода и температурой почвы характеризуется высокой ($r=0,79...0,87$), а с влажностью – средней ($r=0,63...0,69$) силой связи (табл. 4). В контроле изменение температуры почвы на 1°C приводит к увеличению/уменьшению эмиссии в течение суток на 7,7 кгСО₂/га ($R^2=0,66$), а при изменении влажности на 1% на 2,4 кгСО₂/га ($R^2=0,40$). С повышением уровня минерального питания отмечали более существенное варьирование в дыхании почвы при изменении температуры и

влажности. В вариантах с NP на 3,0 и 4,0 т/га зерна изменение температуры почвы на 1°C приводило к изменению интенсивности суточной эмиссии СО₂ на $\pm 9,1$ и $\pm 10,5$ кгСО₂/га ($R^2=0,62...0,70$), а при изменении влажности почвы на 1% – на $\pm 3,2$ и $\pm 3,4$ кгСО₂/га в сутки ($R^2=0,46...0,48$). В высоко удобренных вариантах NP на 5,0 и 6,0 т/га зерна суточная эмиссия изменялась на $\pm 12,7$ и $\pm 13,0$ кгСО₂/га в сутки ($R^2=0,74...0,76$), при варьировании температуры почвы на $\pm 1^\circ\text{C}$ и на $\pm 3,7$ и $\pm 3,9$ кгСО₂/га ($R^2=0,40$) при изменении влажности на 1%.

Таблица 4 – Корреляционная и регрессионная связь между температурой и влажностью почвы с эмиссией диоксида углерода в зависимости от доз минеральных удобрений

Table 4 — Correlation and regression relationship between soil temperature and moisture with carbon dioxide emission depending on mineral fertilizer doses

Культура / пар	Температура/ влажность	r	R ²	Уравнение регрессии
Контроль	температура	0,81	0,66	$y = 7,6672x - 45,3$
Контроль	влажность	0,63	0,40	$y = 2,4369x + 5,2$
NP на 3,0 т/га	температура	0,79	0,62	$y = 9,0729x - 52,5$
NP на 3,0 т/га	влажность	0,69	0,48	$y = 3,2303x - 1,9$
NP на 4,0 т/га	температура	0,84	0,70	$y = 10,484x - 65,2$
NP на 4,0 т/га	влажность	0,68	0,46	$y = 3,355x + 1,2$
NP на 5,0 т/га	температура	0,87	0,76	$y = 12,762x - 80,8$
NP на 5,0 т/га	влажность	0,63	0,40	$y = 3,7423x + 8,3$
NP на 6,0 т/га	температура	0,86	0,74	$y = 13,016x - 77,8$
NP на 6,0 т/га	влажность	0,63	0,40	$y = 3,9162x + 10,1$

Выводы. Температура почвы под посевами яровой пшеницы в слое 0...30 см в контроле с мая по июль повышалась с 10,5 до 19,7°C и в дальнейшем опускалась к середине осени до 8,2°C. В удобренных вариантах динамика изменений была схожей, за исключением июля, когда по мере улучшения минерального питания температура почвы снижалась до 18,9...19,3°C. Влажность почвы не зависела от уровня минерального питания и варьировала в зависимости от количества выпавших осадков от 17,4 до 30,1% в течение вегетации.

При естественном уровне питания дыхание почвы в течение вегетации варьировало от 12,6 до 113,0 кг CO₂/га в сутки. В удобренных вариантах оно повышалось до 13,1...173,6 кг CO₂/га

в сутки. Корреляция между эмиссией диоксида углерода и температурой почвы характеризовалась связью высокой силы ($r=0,79...0,87$), с влажностью – средней ($r=0,63...0,69$).

Изменение температуры почвы на 1°C на фоне естественного плодородия приводит к изменению суточной эмиссии на 7,7 кг CO₂/га, по мере улучшения условий минерального питания размах варьирования величины этого показателя возрастает до 9,1...13,0 кг CO₂/га в сутки. При изменении влажности почвы на 1% продуцирование CO₂ в сутки сдвигается соответственно на 2,4 кг/га и 3,2...3,9 кг CO₂/га.

Сведения о финансировании. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-10005.

Литература

1. Bevacqua E., Schleussner C. F., Zscheischler J. A year above 1.5 °C signals that Earth is most probably within the 20-year period that will reach the Paris Agreement limit // *Nature climate change*. 2025. Vol. 15. No. 3. P. 262–265. URL: <https://www.nature.com/articles/s41558-025-02246-9> (дата обращения: 25.07.2025).
2. Cannon A. J. Twelve months at 1.5 °C signals earlier than expected breach of Paris Agreement threshold // *Nature climate change*. 2025. Vol. 15. No. 3. P. 266–269. URL: <https://www.nature.com/articles/s41558-025-02247-8> (дата обращения: 25.07.2025).
3. Абрамов Н. В., Топорков И. Н., Семизоров С. А. Оценка эмиссии диоксида углерода при минимизации основной обработки черноземной почвы в северной лесостепи Западной Сибири // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2025. № 3. С. 48–54. doi: 10.31857/S2500208225030108.
4. Азнаева М. Р., Захитов А. Х., Дударова Д. Г. Агротехнологический потенциал фосфатмобилизирующих микроорганизмов, выделенных из чернозема обыкновенного степной зоны Кабардино-Балкарской Республики // *Агрохимия*. 2025. № 4. С. 88–96. doi: 10.31857/S0002188125040102.
5. Демин Е. А., Миллер С. С. Влияние возрастающих доз минеральных удобрений на баланс органического углерода в посевах яровой пшеницы в условиях лесостепной зоны Зауралья // *Аграрная наука Северо-Востока*. 2024. № 6. С. 1069–1080. doi: 10.30766/2072-9081.2024.25.6.1069-1080.
6. Сафин Р. И., Валиев А. Р., Колесар В. А. Современное состояние и перспективы развития углеродного земледелия в Республике Татарстан // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2021. Т. 16. № 3 (63). С. 7–13. doi: 10.12737/2073-0462-2021-7-13.
7. Биологическая активность и содержание гумуса пахотных почв в зависимости от рельефа, климатических условий и сельскохозяйственных культур / Л. Н. Караулова, О. Г. Чуян, Н. В. Афонченко и др. // *Земледелие*. 2025. № 2. С. 27–33. doi: 10.24412/0044-3913-2025-2-27-33.
8. Демин Е. А., Миллер С. С. Влияние минеральных удобрений на поступление и запасы органического углерода в зернопаровом севообороте лесостепной зоны Зауралья // *Siberian journal of life sciences and agriculture*. 2024. Т. 16. № 5. С. 262–287. doi: 10.12731/2658-6649-2024-16-5-987.
9. Абрамов Н. В. Воспроизводство плодородия почв УрФО // *АПК России*. 2017. Т. 24. № 5. С. 1055–1065.
10. Еремин Д. И., Демин Е. А. Влияние длительного сельскохозяйственного использования на запасы органического углерода в черноземе выщелоченном // *Земледелие*. 2023. № 4. С. 35–39. doi: 10.24412/0044-3913-2023-4-35-39.
11. Еремин Д. И., Ахтямова А. А. Минерализация гумуса в пахотном черноземе при использовании минеральных удобрений // *Земледелие*. 2018. № 7. С. 16–18. doi: 10.24411/0044-3913-2018-10704.
12. Чимитдоржиева Э. О., Цыбенков Ю. Б., Чимитдоржиева Г. Д. Эмиссия CO₂ из пахотных черноземов западного Забайкалья // *Агрохимия*. 2024. № 5. С. 45–53. doi: 10.31857/S0002188124050063.
13. Распределение компонентов углеродного цикла почв лесных экосистем северной, средней и южной тайги Западной Сибири / А. А. Бобрик, О. Ю. Гончарова, Г. В. Матышак и др. // *Почвоведение*. 2020. № 11. С. 1328–1340. doi: 10.31857/S0032180X20110052.
14. Еремин Д. И., Попова О. Н. Формирование почвенной микрофлоры в антропогенно-преобразованных почвах // *Вестник Государственного аграрного университета Северного Зауралья*. 2015. № 4. С. 7–12.
15. Сорокина М. В., Лобков В. Т., Бобкова Ю. А. Влияние приемов основной обработки серой лесной почвы на её биологическую активность и урожайность озимой пшеницы // *Вестник Орловского государственного аграрного университета*. 2016. № 5. С. 47–53.
16. Сезонная динамика эмиссии диоксида углерода при различных технологиях введения залежей в оборот в зависимости от природной зоны Западной Сибири / И. А. Бобренко, О. В. Дрофа, Н. В. Гоман, и др. // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2024. № 7. С. 35–42.
17. Золотухин А. Н. Интенсивность дыхания черноземных почв под посевами озимой пшеницы с различными дозами минеральных удобрений // *Агрохимический вестник*. 2024. № 3. С. 91–95. doi: 10.24412/1029-2551-2024-3-016.
18. Свирина В. А., Черногаев В. Г. Влияние минеральных удобрений и известкования на динамику эмиссии CO₂, урожай и качество продукции культур звена севооборота // *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2024. № 5. С. 45–50. doi: 10.31857/S2500208224050106.
19. Митрофанов С. В., Серова Е. В., Орлова Н. В. Влияние применения удобрений на баланс основных элементов питания и эмиссию парниковых газов в Германии // *Агрохимия*. 2024. № 5. С. 54–63. doi: 10.31857/S0002188124050078.

20. Демидов Д. В., Гусева Ю. Е., Налиухин А. Н. Биомодификация как способ повышения эффективности минеральных удобрений и снижения углеродного следа при возделывании ярового ячменя и яровой пшеницы в условиях Центрального Нечерноземья // Достижения науки и техники АПК. 2025. Т. 39. № 1. С. 25–30. doi: 10.53859/02352451_2025_39_1_25.

21. Митрофанов Д. В. Влияние температуры, влажности, нитратного азота на биологическую активность почвы и урожайность твёрдой пшеницы // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2024. № 5 (77). С. 91–102. doi:10.32786/2071-9485-2024-05-10.

22. Митрофанов Д. В. Воздействие влажности, температуры и биологической активности почвы на урожайность гороха в засушливых условиях Оренбуржья // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 1 (65). С. 31–38. doi: 10.18286/1816-4501-2024-1-31-38.

References

1. Bevacqua E, Schleussner CF, Zscheischler Ja. A year above 1.5°C signals that Earth is most probably within the 20-year period that will reach the Paris Agreement limit. [Internet]. Nature climate change. 2025; Vol.15. No.3. 262-265 p. [cited 2025, July 25]. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41558-025-02246-9>.

2. Cannon AJ. Twelve months at 1.5°C signals earlier than expected breach of Paris Agreement threshold. [Internet]. Nature climate change. 2025; Vol.15. No.3. 266-269 p. [cited 2025, July 25]. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41558-025-02247-8>.

3. Abramov NV, Toporkov IN, Semizorov SA. [Assessment of carbon dioxide emission during minimization of primary tillage of chernozem soil in the northern forest-steppe of Western Siberia]. Vestnik Rossiyskoy selskokhozyaystvennoy nauki. 2025; 3. 48-54 p. doi: 10.31857/S2500208225030108.

4. Aznaeva MR, Zakhilov AKh, Dudarova DG. [Agrotechnological potential of phosphate-mobilizing microorganisms isolated from ordinary chernozem of steppe zone of Kabardino-Balkarian Republic]. Agrokimiya. 2025; 4. 88-96 p. doi: 10.31857/S0002188125040102.

5. Demin EA, Miller SS. [Effect of increasing doses of mineral fertilizers on balance of organic carbon in spring wheat crops in the forest-steppe zone of the Trans-Urals]. Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka. 2024; 6. 1069-1080 p. doi: 10.30766/2072-9081.2024.25.6.1069-1080.

6. Safin RI, Valiev AR, Kolesar VA. [Current state and prospects for the development of carbon farming in the Republic of Tatarstan]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021; Vol.16. 3 (63). 7-13 p. doi: 10.12737/2073-0462-2021-7-13.

7. Karaulova LN, Chuyan OG, Afonchenko NV. [Biological activity and humus content of arable soils depending on relief, climatic conditions and agricultural crops]. Zemledelie. 2025; 2. 27-33 p. doi: 10.24412/0044-3913-2025-2-27-33.

8. Demin EA, Miller SS. [Effect of mineral fertilizers on supply and reserves of organic carbon in grain-fallow crop rotation in the forest-steppe zone of the Trans-Urals]. Siberian journal of life sciences and agriculture. 2024; Vol.16. 5. 262-287 p. doi: 10.12731/2658-6649-2024-16-5-987.

9. Abramov NV. [Soil fertility restoration in Ural Federal District]. APK Rossii. 2017; Vol.24. 5. 1055-1065 p.

10. Eremin DI, Demin EA. [Impact of long-term agricultural use on organic carbon reserves in leached chernozem]. Zemledelie. 2023; 4. 35-39 p. doi: 10.24412/0044-3913-2023-4-35-39.

11. Eremin DI, Akhtyamova AA. [Humus mineralization in arable chernozem with the use of mineral fertilizers]. Zemledelie. 2018; 7. 16-18 p. doi: 10.24411/0044-3913-2018-10704.

12. Chimitdorzhieva EO, Tsybenov YuB, Chimitdorzhieva GD. [CO₂ emission from arable chernozem of Western Baykal region]. Agrokimiya. 2024; 5. 45-53 p. doi: 10.31857/S0002188124050063.

13. Bobrik AA, Goncharova OYu, Matyshak GV. [Distribution of carbon cycle components in soils of forest ecosystems of the northern, middle and southern taiga of Western Siberia]. Pochvovedenie. 2020; 11. 1328-1340 p. doi: 10.31857/S0032180X20110052.

14. Eremin DI, Popova ON. [Formation of soil microflora in anthropogenically transformed soils]. Vestnik Gosudarstvennogo agrarnogo universiteta Severnogo Zauralya. 2015; 4. 7-12 p.

15. Sorokina MV, Lobkov VT, Bobkova YuA. [Influence of primary tillage techniques of gray forest soil on its biological activity and winter wheat yield]. Vestnik Orlovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2016; 5. 47-53 p.

16. Bobrenko IA, Drofa OV, Goman NV. [Seasonal dynamics of carbon dioxide emissions with different technologies of introducing fallow lands into rotation depending on the natural zone of Western Siberia]. Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2024; 7. 35-42 p.

17. Zolotukhin AN. [Respiration intensity of chernozem soils under winter wheat crops with different doses of mineral fertilizers]. Agrokhimicheskiy vestnik. 2024; 3. 91-95 p. doi: 10.24412/1029-2551-2024-3-016.

18. Svirina VA, Chernogaev VG. [Influence of mineral fertilizers and liming on the dynamics of CO₂ emissions, yield and quality of crops in the crop rotation link]. Vestnik Rossiyskoy selskokhozyaystvennoy nauki. 2024; 5. 45-50 p. doi: 10.31857/S2500208224050106.

19. Mitrofanov SV, Serova EV, Orlova NV. [Influence of fertilizer application on balance of essential nutrients and greenhouse gas emissions in Germany]. Agrokimiya. 2024; 5. 54-63 p. doi: 10.31857/S0002188124050078.

20. Demidov DV, Guseva YuE, Naliukhin AN. [Biomodification as a way to increase the efficiency of mineral fertilizers and reduce the carbon footprint in the cultivation of spring barley and spring wheat in Central Non-Black Earth region]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2025; Vol.39. 1. 25-30 p. doi: 10.53859/02352451_2025_39_1_25.

21. Mitrofanov D. V. [Effect of temperature, humidity and nitrate nitrogen on soil biological activity and durum wheat yield]. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie. 2024; 5 (77). 91-102 p. doi: 10.32786/2071-9485-2024-05-10.

22. Mitrofanov DV. [Effect of soil humidity, temperature and biological activity on pea yield in arid conditions of Orenburg region]. Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2024; 1 (65). 31-38 p. doi: 10.18286/1816-4501-2024-1-31-38.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Дёмин Евгений Александрович – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник Центра фундаментальных и прикладных агrobiотехнологий Тюменского государственного университета (625003, Российская Федерация, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6), e-mail: gambitn2013@yandex.ru, ORCID 0000-0003-2542-3678

Ахтямова Анастасия Андреевна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник Центра фундаментальных и прикладных агrobiотехнологий Тюменского государственного университета (625003, Российская Федерация, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 6), e-mail: gen.i72@mail.ru, ORCID 0000-0003-0297-6958

Вклад авторов:

Е.А. Дёмин – получение грантов и финансирования, научное руководство проектом, редактирование, доработка текста;

А.А. Ахтямова – проведение экспериментов, сбор данных, написание первоначального текста статьи.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 31.07.2025; одобрена после рецензирования 31.03.2026; принята к публикации 01.04.2026.

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

Authors:

Demin Evgeniy Aleksandrovich – Ph.D. of Agricultural Sciences, senior researcher of Center for Fundamental and Applied Agrobiotechnology Tyumen State University (6 Volodarskogo Street, Tyumen, 625003, Russian Federation), e-mail: gambitn2013@yandex.ru, ORCID 0000-0003-2542-3678

Akhtyamova Anastasiya Andreevna – Ph.D. of Agricultural Sciences, senior researcher of Center for Fundamental and Applied Agrobiotechnology Tyumen State University (6 Volodarskogo Street, Tyumen, 625003, Russian Federation), e-mail: gen.i72@mail.ru, ORCID 0000-0003-0297-6958

Contribution of the authors:

Е.А. Дёмин – Funding acquisition, supervision, Writing – review & Editing.

А.А. Akhtyamova – Investigation, Writing – original draft.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 31.07.2025; revised 31.03.2026; accepted 01.04.2026.



**ХОЗЯЙСТВЕННО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ
ЛИНИЙ ЯРОВОЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ НА СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ
ПРЕДКАМСКОЙ ЗОНЫ РТ**© 2026 Кадырова Ф. З.¹✉, Галимзянов С. Ф.^{1,2}¹Казанский государственный аграрный университет
(г. Казань, Российская Федерация)²Филиал ФГБУ «Россельхозцентр» по Республике Татарстан
(г. Казань, Российская Федерация)
✉ fanusa51@rambler.ru

Реферат. Исследования по оценке перспективных линий яровой мягкой пшеницы проведены в 2022–2025 годы в Предкамской зоне Республики Татарстан на серых лесных среднесуглинистых почвах. Объектами изучения были линии, предоставленные Российским ГАУ – ТСХА им. К.А. Тимирязева Казанскому ГАУ для экологического испытания в условиях Среднего Поволжья. По результатам оценки 2022-2024 годов, с целью дальнейшего использования в селекции оставлено две линии. В данной работе представлены хозяйственно-биологические особенности выделенных линий, перспективных для условий РТ. Стандарт – сорт Йолдыз селекции Казанского ФИЦ РАН. Полевые опыты закладывались по методике Государственного сортоиспытания (площадь делянки 20 м², повторность 3-кратная, фон НРК 106 кг д.в./га). Проводились фенологические наблюдения, учёт урожайности, оценка поражённости корневыми гнилями и мучнистой росой, полегания растений, оценка качества зерна. В 2024 году в период колошения у стандартного сорта Йолдыз было поражено корневыми гнилями 90% растений, развитие болезни в среднем у основания стебля и подземном междоузлии составило 7,36%, у Линии 15 — 50% поражённых растений при 5,25% развития болезни; в 2025 году наименьшее развитие было у Линии 10 (2,75%). По устойчивости к мучнистой росе эти 2 линии также превосходят стандарт. В 2025 году мучнистая роса поражала до 8,0% поверхности листьев у 100% растений Линии 10, до 5,5% у 70% растений Линии 15. Наиболее урожайной за годы испытания была Линия 10 (3,85 т/га), превышение над стандартом составило 21,8%. Урожайность относительно стабильна по годам, менее других сортов снижается в неблагоприятные годы, а в благоприятные годы сорт проявляет отзывчивость к улучшению условий среды. Зерно отличается повышенным содержанием белка (14,9%), сырой клейковины (26,0%), при средней массе 1000 зерен 39,3 г, натурной массе 768 г/л. Линия 10 рекомендована как источник ценных хозяйственных признаков в селекции для условий Среднего Поволжья. Селекционная ценность Линии 15 обусловлена повышенной иммунностью и способностью формировать крупное зерно в засушливых условиях.

Ключевые слова: яровая пшеница, перспективные линии, корневые гнили, мучнистая роса, полегание, стрессоустойчивость, адаптивность.

Для цитирования: Кадырова Ф.З., Галимзянов С.Ф. Хозяйственно-биологические особенности перспективных линий яровой мягкой пшеницы на серых лесных почвах Предкамской зоны РТ // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 37-43. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-37-43

**AGROECONOMIC AND BIOLOGICAL CHARACTERISTICS OF PROMISING
LINES OF SPRING SOFT WHEAT ON GRAY FOREST SOILS OF KAMA ZONE
OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN**© 2026 Kadyrova F. Z.^a✉, Galimzyanov S. F.^{a,b}^aKazan State Agrarian University
(Kazan, Russian Federation)^bBranch of Federal State Budgetary Institution "Rosselkhoztsentr" in the Republic of Tatarstan
(Kazan, Russian Federation)
✉ fanusa51@rambler.ru

Abstract. Research to evaluate promising spring soft wheat lines was conducted in 2022-2025 in Kama zone of the Republic of Tatarstan on gray forest medium-loamy soil. The study objects were lines provided by Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy to Kazan State Agrarian University for environmental testing in middle Volga region. Based on the results of 2022-2024 years evaluation, two lines were retained for further use in breeding. This paper presents the economic and biological characteristics of the selected lines, which are promising for the conditions of the Republic of Tatarstan. The standard is Yoldyz variety, bred by Kazan Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. Field trials were conducted according to the State Variety Testing methodology (plot area 20 m², 3 replicates, NPK background of 106 kg active ingredient/ha). Phenological

observations and yield measurements were made, root rot and powdery mildew infestation, plant lodging and grain quality were conducted. In 2024, during the heading period, 90% of plants of standard Yoldyz variety were affected by root rot, with the disease development at the base of the stem and underground internode amounting to 7.36% on average. For Line 15 – 50% of plants were affected, with the disease development rate being 5.25%. In 2025 Line 10 had the lowest development (2.75%). These two lines also surpass the standard in terms of powdery mildew resistance. In 2025 powdery mildew affected up to 8.0% of the leaf surface in 100% of Line 10 plants, and up to 5.5% in 70% of Line 15 plants. Line 10 was the most productive over the years of testing (3.85 t/ha), exceeding the standard by 21.8%. The productivity is relatively stable over the years, decreasing less than other varieties in unfavorable years and the variety shows responsiveness to improving environmental conditions in favorable years. The grain is distinguished by increased protein content (14.9%), wet gluten (26.0%), with an average 1000-kernel weight of 39.3 g and a natural weight of 768 g/l. Line 10 is recommended as a source of valuable economic traits in breeding for the conditions of middle Volga region. The breeding value of Line 15 is due to increased immunity and the ability to form large grains in arid conditions.

Key words: spring wheat, promising lines, root rot, powdery mildew, lodging, stress resistance, adaptability.

For citation: Kadyrova FZ, Galimzyanov SF. [Agroeconomic and biological characteristics of promising lines of spring soft wheat on gray forest soils of Kama zone of the Republic of Tatarstan]. Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2026; Vol. 21. 1(81). 37-43 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-37-43

Введение. В условиях продолжающегося изменения климата и усиления аридизации для зернового производства всё более актуальным становится создание новых сортов яровой мягкой пшеницы, устойчивых к комплексу неблагоприятных факторов, прежде всего к дефициту влаги и температурным стрессам [1, 2, 3]. При этом современные селекционные разработки должны сочетать стрессоустойчивость с высокой конкурентоспособностью по урожайности и показателям качества зерна, поскольку именно сочетание продуктивности, качества адаптивности определяет востребованность сорта в производстве [4, 5, 6].

Яровая пшеница остаётся одной из ключевых продовольственных культур, формируя основу сырьевой базы для переработки и обеспечивая стабильность зернового рынка. Для России, как одного из ведущих участников мирового рынка пшеницы, повышение устойчивости и предсказуемости производства зерна имеет не только технологическое, но и экономическое значение.

В Республике Татарстан яровая мягкая пшеница занимает значительные посевные площади (около 450 тыс. га), однако в неблагоприятные по увлажнению и температурному режиму годы культура характеризуется выраженной вариабельностью урожайности [7, 8, 9]. В этих условиях возрастает роль селекции на экологическую пластичность и стабильность продуктивности сортов, то есть на способность генотипа поддерживать приемлемый уровень урожайности при

ухудшении условий среды [10].

Практическая селекция и первичная оценка материала, тем не менее, неизбежно опираются на комплексную хозяйственно-биологическую характеристику: анализ урожайности, элементов структуры урожая и ключевых показателей качества зерна (в том числе масса 1000 зёрен, как признак выполненности и потенциальной товарности) [11, 12, 13].

В связи с этим, для практической селекции актуальным является задача расширения генофонда и углублённой оценки исходного материала для создания сортов яровой мягкой пшеницы, адаптированных к региональным условиям, сочетающих признаки экологической пластичности, стабильности урожая и качества зерна [14, 15, 16].

Цель исследования – на основе комплексной оценки хозяйственно-биологических свойств выделить и рекомендовать для селекции перспективные линии яровой мягкой пшеницы, адаптированные к условиям Предкамской зоны РТ.

Условия, материалы и методы. В 2022 году в экологическое испытание было включено 14 линий яровой мягкой пшеницы, созданные совместно с Российским ГАУ – ТСХА им. К.А. Тимирязева. По итогам первичной оценки (мелкосемянность и низкая засухоустойчивость) часть линий была исключена из дальнейшего сортоиспытания. Для многолетней детальной оценки в 2022–2025 годы оставлены две линии (Линия 10 и Линия 15), и стандартный сорт Йолдыз селекции Казанского ФИЦ РАН.

Таблица 1 – Краткая характеристика перспективных линий яровой мягкой пшеницы

Table 1 – Brief characteristics of promising lines of spring soft wheat

Генотип	Гибридная комбинация	Краткая характеристика генотипа
Линия 10	(Иволга × Галина)	Р/в <i>lutescens</i> , отбор из популятивного сорта Биора 2, среднеспелый(90-95 дней), среднерослый, устойчив к полеганию, колос цилиндрический.
Линия 15	(Иволга × Галина)	Р/в <i>lutescens</i> , отбор из популятивного сорта Биора 2, среднеспелый, веретеновидный крупный колос

Полевые опыты закладывались по методике Государственного сортоиспытания на экспериментальном участке Казанского ГАУ. Почва серая лесная среднесуглинистая. Содержание гумуса в пахотном слое 3,4%, содержание подвижного фосфора – 287 мг/кг, содержание обменного калия – 125 мг/кг, рН сол. – 6,4.

Предшественниками были озимая рожь, озимая пшеница. Почва обрабатывалась по общепринятой в зоне технологии: зяблевая вспашка, весной – закрытие влаги и предпосевная двухкратная культивация. Под культивацию внесены сложные удобрения из расчета 106 кг. д.в. NPK. Учетная площадь делянок – 20 м², повторность трехкратная. Посев проведен 10 мая деляночной сеялкой порционного высева с нормой 5,5 млн зерен на гектар. Уборка проводилась деляночным комбайном 16 августа.

Проводились фенологические наблюдения, оценка сортов по устойчивости к корневым гнилям и листовым болезням. Расчет распространенности и интенсивности развития листовых болезней рассчитывали по общепринятым в фитопатологии формулам с использованием шкалы Джеймса, корневых болезней по шкале Пирсона. Оценивали полегаемость сортов, урожайность сортов учитывали по выходу товарного зерна с пересчетом на стандартную влажность, оценивали особенности структуры растений и качество зерна.

Климатические условия вегетации растений анализировались по данным метеопоста Казанского ГАУ на территории опытного поля. В целом вегетационный период 2022 года отличался сравнительно умеренными температурами и достаточным количеством атмосферных осадков для формирования высокого урожая. В 2023 году вегетация яровой пшеницы длилась 98 дней и протекала в температурных условиях, приближенных к средним многолетним нормам. Вегетационный период 2024 года по температурным условиям был умеренным для пшеницы, но основные этапы формирования элементов структуры урожая были охвачены засухой. Продолжительность вегетационного периода составила 105 дней. В 2025 году среднесуточная температура вплоть до колошения держалась на уровне многолетней нормы при умеренном количестве атмосферных осадков. Это способствовало формированию дружных всходов и активному вегетативному росту растений. Благоприятствовали эти условия развитию и распространению листовых болезней. С середины июля в период молочной и восковой спелости установилась сухая погода и отмечался дефицит атмосферных осадков, составивший 10% относительно многолетней нормы. Но, запасы продуктивной влаги в почве, все же позволили сформировать сортам массу тысячи зерен на уровне 35...50 граммов с количеством клейковины на уровне третьего

класса. Продолжительность вегетации сортов длилась 90 дней.

Результаты и обсуждение. Величина и стабильность урожаев зерна во многом определяется степенью восприимчивости сортов к патогенной микрофлоре, наиболее вредоносными для урожая среди них являются возбудители корневых гнилей и листовых болезней.

Оценка устойчивости к корневым гнилям в среднем за 2024 – 2025 годы показала относительно более низкую восприимчивость Линии 15 к возбудителям этого заболевания. Так в 2024 году в фазе колошения распространенность корневых гнилей на сорте Йолдыз достигла 90%, интенсивность поражения составила 7,36% по шкале Пирсона, тогда как у Линии 15 болезнь отмечалась на 50% растений с интенсивностью 0,83%. В 2025 году в эту фазу преимущество имела Линия 10 с пораженностью лишь 2,75% поверхности тканей корней на 70% растений, тогда как у сорта Йолдыз отмечалась поражение 80% растений с интенсивностью 5,0%. В среднем за 2 года у стандарта интенсивность поражения составила 6,18%, у Линии 10 – 4,46, у Линии 15 – 3,79%.

Следует отметить, что по устойчивости к мучнистой росе эти линии в среднем за 2024 – 2025 годы также превосходят стандарт. В 2024 году интенсивность поражения мучнистой росой листьев Линии 10 составила 1,75% по шкале Джеймса на 20% растений, у Линии 15 – 2,12%, тогда как пораженность листьев стандарта достигала 29,6% на всех растениях выборки. В 2025 году отмечалось массовое поражение мучнистой росой. У Линии 10 в фазе колошения было поражено 8% поверхности листьев 100% растений, у Линии 15 – 5,5% поверхности у 70% растений. На растениях стандарта пораженность составила 12,5% листовой поверхности на 100% растений.

В условиях 2025 года сложились благоприятные условия для формирования большой вегетативной массы растений. Наиболее высокорослые сорта сформировали длину растений до 125 см. По этой причине, и в связи со слабым развитием корневой системы у большинства сортов яровой пшеницы отмечалось прикорневое полегание растений в период молочной спелости. При практически полном полегании растений стандартного сорта, растения Линии 10 не полегли, на делянках Линии 15 отмечалось полегание 25-30% растений. В предыдущие годы полегаемость на сортах не отмечалась.

Урожайность сортов по годам варьировала в значительном диапазоне (табл. 2). Так, в наименее благоприятном 2024 году, с наиболее низким индексом среды, урожайность у сортов варьировала в интервале от 2,17 т/га у стандарта до 2,48 т/га у Линии 10. В сравнительно более благоприятном, по индексу среды, 2023 году диапазон урожайности был в интервале от 3,32 т/га у стандарта до 5,0 т/га у наиболее урожайной Линии 10.

Таблица 2 – Урожайность и пластичность сортов яровой мягкой пшеницы за годы исследований

Table 2 – Yield and plasticity of spring soft wheat varieties over the research years

Сорт	Урожайность зерна за годы, т/га					*Стрессоустойчивость	*b _i	Общая адаптивная способность	Стабильность сорта	Специфическая адаптивная способность
	2022	2023	2024	2025	Средняя урожайность за 4 г.					
Йолдыз	3,43	3,32	2,17	3,72	3,16	1,55	0,10	0,79	4,42	0,14
Линия 10	3,16	5,00	2,48	4,75	3,85	1,84	0,21	1,47	35,75	1,38
Линия 15	2,73	3,76	2,45	2,92	2,97	1,31	0,08	0,59	11,85	0,35
НСР ₀₅	0,15	0,42	0,31	0,51						
Индекс среды	- 0,22	0,70	- 0,96	0,47						

*Стрессоустойчивость – $y_{max} - y_{min}$

*b_i – коэффициент линейной регрессии – реакция генотипа на улучшение условий среды (по Кильчевскому, 1985) [17]

*Stress tolerance – $Y_{max} - Y_{min}$

*b_i – linear regression coefficient – genotype response to improved environmental conditions (according to Kilchevsky, 1985) [17]

Примечательно то, что нижний уровень урожайности линий, полученный в год с наиболее отрицательным индексом среды (2024 год) – примерно на одном уровне и превышает стандарт на 13-14%. Но, на улучшение условий среды наиболее отзывчива Линия 10, которая в наиболее благоприятном по гидротермическим условиям 2023 году обеспечила получение урожайности 5,0 т/га и превысила стандарт по урожайности на 50,6%.

Обобщение данных урожайности за прошедшие 4 года показало, что в среднем наиболее урожайной, среди оцениваемых генотипов была Линия 10. Ее средняя урожайность составила 3,85 т/га, что превышает стандартный сорт Йолдыз на 21,8%. Линия 15 уступила ему на 7,0%. Расчеты показывают, что Линия 10 обладает большей стрессоустойчивостью, в то же время

повышенной как общей, так и специфической адаптивностью и способна формировать более высокую урожайность.

Величину продуктивности растений пшеницы определяют длина колоса и число зерен в колосе. Анализ показал, что колос стандартного сорта Йолдыз более плотный, при средней длине 6,8 см содержит 14 колосков (табл. 3). Плотность колоса (отношение числа колосков к длине колоса) составила в среднем за 2023-2025 годы – 2,06. Линия 10 – при средней длине 8,1 см закладывала 13,8 колосков, плотность колоса составила 1,7, а Линия 15 – при длине 7,7 см закладывала 13,6 колосков, плотность колоса составила 1,8. Но, число зерен в колосе больше у Линии 10 и составило 37,4 шт. при массе зерна с колоса 1,26 г, превышая стандарт на 0,11 г, и Линию 15 на 0,16 г.

Таблица 3 – Средние значения продуктивности колоса сортов яровой мягкой пшеницы (2023-2025 годы)

Table 3 – Average values of ear productivity for spring soft wheat varieties (2023–2025)

Сорт	Длина колоса, см	Число колосков в колосе	Плотность колоса	Число зерен в колосе	Масса зерна с колоса, г
Йолдыз	6,8	14,0	2,06	27,4	1,15
Линия 10	8,1	13,8	1,7	37,4	1,26
Линия 15	7,7	13,6	1,8	27,4	1,10

По крупности зерна стабильное преимущество перед стандартом имела Линия 15, масса 1000 зерен которой составила в среднем 40,0 г, с варьированием по годам от 38,1 до 41,8 г (табл. 4). Масса 1000 зерен Линии 10 варьировала от 36,7 до 42,4 г., размах изменчивости составил 5,7 г. при среднем значении массы зерен 39,3 г. У стандартного сорта Йолдыз этот показатель

был наиболее вариабелен. В наименее благоприятном для формирования урожая 2023 году, масса 1000 зерен этого сорта снизилась до 27,3 г, размах изменчивости составил 16,1 г при среднем значении за годы – 36,3 г., то есть стандарт уступил новым линиям по озерненности колоса и массе 1000 зерен в годы с неблагоприятными условиями вегетации.

Таблица 4 – Параметры массы 1000 зерен и натуры зерна сортов яровой мягкой пшеницы

Table 4 – Parameters of 1000-grain weight and grain test weight for spring soft wheat varieties

Сорт	Масса 1000 зерен за годы, г				Натура зерна за годы, г/л			
	2023	2024	2025	ср	2023	2024	2025	ср
Йолдыз	38,2	27,3	43,4	36,3	800	835	746	793,7
Линия 10	36,7	36,9	42,4	39,3	810	851	768	809,7
Линия 15	40,0	38,1	41,8	40,0	820	817	779	805,3

По натуре зерна изучавшиеся сорта соответствовали требованиям 1-2 го классов для мягкой пшеницы. Наибольшая натурная масса формировалась у сортов в 2024 году, а наименьшая – в 2025 году, когда условия благоприятствовали формированию более крупного зерна и плотность сложения в единице объема уменьшилась, что обусловлено увеличением межзернового

пространства у сортов. Наименьшее варьирование выполненности зерна также отмечалось у Линии 15, при средней натуре зерна 805,3 г /л зерна, что превысило в среднем значение стандарта на 11,6 г.

Анализ хлебопекарных характеристик зерна был проведен нами по данным испытания 2025 года (табл. 5).

Таблица 5 – Оценка хлебопекарных свойств зерна сортов яровой мягкой пшеницы (2025 год)
Table 5 – Evaluation of baking quality of grain in spring soft wheat varieties (2025)

Сорт	Количество клей ковины, %	Массовая доля белка, %	Стекловид- ность, %	Класс по количеству клейковины	Класс по количеству белка	Класс по стекловид- ности
Йолдыз	19,0	12,4	45	4	3	3
Линия 10	26,0	14,9	48	3	1	3
Линия 15	23,0	13,8	47	3	2	3

Как свидетельствуют результаты исследований, приведенные в таблицах 4 и 4 наибольшую ценность по качеству зерна представляет Линия 10, в которой сочетаются повышенная крупность зерна, количество клейковины, массовая доля белка и стекловидность. Заслуживает внимания также и Линия 15, выделяющаяся стабильностью формирования крупности и выполненности зерна в меняющихся условиях среды.

Выводы. По результатам четырехлетнего изучения линий яровой мягкой пшеницы (Йолга × Галина) в условиях Предкамской зоны РТ выделены две перспективные линии – 10 и 15, превышающие стандартный сорт Йолдыз по комплексу хозяйственно-биологических признаков.

Линия 10 характеризуется высокой продуктивностью (средняя урожайность 3,85 т/га, +21,8% к стандарту), отзывчивостью на улучшение условий ($b_i = 0,21$), устойчивостью к полеганию и повышенными показателями

качества зерна (белок 14,9%, клейковина 26,0%), что позволяет рекомендовать её в качестве источника признаков интенсивности и качества зерна в селекции.

Линия 15 отличается стабильностью массы 1000 зерен (в среднем 40,0 г) и натуры зерна по годам, а также повышенной устойчивостью к корневым гнилям и мучнистой росе в отдельные годы, что представляет ценность для селекции на стабильность и толерантность к болезням.

Обе линии могут быть использованы в качестве исходного материала в селекционных программах Среднего Поволжья, направленных на создание сортов с высокой адаптивностью и качеством зерна.

Сведения о финансировании. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России) в рамках Соглашения № 075-15-2025-243.

Литература

1. Frantová N., Guardia – Velarde L., Jovanović I., Weih M. Genotype adaptive patterns in spring wheat reveal drought-induced differentiation in root morphology // *Frontiers in Plant Science*. 2025. Vol. 16. Article 1534211. doi: 10.3389/fpls.2025.1534211.
2. Ерсин Л. Е. Применение метода генотипирования в селекции яровой мягкой пшеницы на засухоустойчивость // *Annali d'Italia*. 2025. № 67. С. 4 - 5. doi: 10.5281/zenodo.15540107.
3. Zotova L. P., Zhumalin A. Kh., Savin T. V. et al. Molecular SNP marking of spring wheat by *tadrl* gene on the drought resistance // *Eurasian Journal of Applied Biotechnology*. 2022. No. 4. P. 92 - 98. doi: 10.11134/btp.4.2022.12.
4. Лукманова А. А., Кадырова Ф. З., Сафин Р. И. Оценка пригодности различных сортов яровой пшеницы для карбонового земледелия // *Агроботехнологии и цифровое земледелие*. 2023. № 1(5). С. 27 - 33. doi: 10.12737/2782-490X-2023-27-33.
5. Формирование урожайности яровой пшеницы в условиях изменения климата в Зауральской степи / К. Р. Исмагилов, Р. С. Кираев, А. С. Шаяхметов, Р. Р. Исмагилов // *Достижения науки и техники АПК*. 2025. Т. 39. № 4. С. 31-36. doi: 10.53859/02352451_2025_39_4_31.
6. Shewry P. R. Wheat // *Journal of Experimental Botany*. 2009. Vol. 60(6). P. 1537-1553.
7. Смоленцева Е. В. Россия на мировом рынке пшеницы: тенденции и перспективы // *Московский экономический журнал*. 2019. № 6. С. 77-86.
8. Оценка продуктивности и экологической пластичности сортов яровой мягкой пшеницы в условиях Республики Татарстан / Р. И. Сафин, А. М. Амиров, С. Л. Турнин, Л. С. Нижегородцева // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2015. Т. 10. № 3(37). С. 148-151. doi: 10.12737/14789.
9. Валееканин В. С., Коробейников Н. И. Комбинационная способность и характер наследования числа зерен главного колоса мягкой яровой пшеницы // *Достижения науки и техники АПК*. 2025. Т. 39. № 8. С. 33-37. doi: 10.53859/02352451_2025_39_8_33.
10. Бесалиев И. Н., Панфилов А. Л., Регер Н. С. Условия вегетации и продолжительность междоузлий периодов вегетации яровой мягкой пшеницы в засушливых условиях // *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2021. № 4(56). С. 19-24. doi: 10.18286/1816-4501-2021-4-19-24.
11. Агеева Е. В., Лихенко И. Е., Советов В. В. Оценка экологической пластичности сортов и линий

яровой мягкой пшеницы в рамках программы Казахстанско-сибирской сети // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2020. № 4(40). С. 7-14. doi: 10.48136/2222-0364 – 2020–4–40–1.

12. Зенкина К. В., Асеева Т. А. Оценка линий и сортов яровой пшеницы мягкой по селекционным индексам // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2025. Т. 20. № 1(77). С. 5-11. doi: 10.12737/2073-0462-2025-1-5-11.

13. Якунина Н. А., Поползухина Н. А., Поползухин П. В., Кротова Л. А. Оценка сортов и линий яровой мягкой пшеницы по урожайности зерна и элементам структуры урожая в контрастных условиях южной лесостепи Западной Сибири // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2023. № 3(51). С. 83-88.

14. Богдан П. М., Коновалова И. В., Клыков А. Г. Влияние абиотических факторов на урожайность и качество зерна яровой мягкой пшеницы в условиях Приморского края // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35. № 1. С. 16-20. doi: 10.24411/0235-2451-2021-10103.

15. Асеева Т. А., Зенкина К. В. Исходный материал яровой пшеницы для экологической зоны Среднего Приамурья // Достижения науки и техники АПК. 2025. Т. 39. № 12. С. 11-16. – doi: 10.53859/02352451_2025_39_12_11.

16. Мадьякин Е. В., Горянин О. И. Исследования по адаптивности сортов яровой пшеницы в Поволжье // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 1(61). С. 40-45. doi: 10.18286/1816-4501-2023-1-40-45.

17. Кильчевский А.В., Хотылева Л.В. Метод оценки адаптивной способности и стабильности генотипов, дифференцирующие способности среды. // Генетика. 1985. Т. XXI. № 9. С. 1481-1497.

References

1. Frantova N, Guardia-Velarde L, Jovanovic I, Weih M. Genotype adaptive patterns in spring wheat reveal drought-induced differentiation in root morphology. *Frontiers in Plant Science*. 2025; Vol.16. Article 1534211. doi: 10.3389/fpls.2025.1534211.

2. Ersin LE. [Application of genotyping method in spring bread wheat breeding for drought tolerance]. *Annali d'Italia*. 2025; 67. 4-5 p. doi: 10.5281/zenodo.15540107.

3. Zotova LP, Zhumalin AKh, Savin TV. Molecular SNP marking of spring wheat by tadr1 gene on the drought resistance. *Eurasian Journal of Applied Biotechnology*. 2022; No.4. 92-98 p. doi: 10.11134/btp.4.2022.12.

4. Lukmanova AA, Kadyrova FZ, Safin RI. [Evaluation of suitability of different spring wheat varieties for carbon farming]. *Agrobiotekhnologii i tsifrovoe zemledelie*. 2023; 1(5). 27-33 p. doi: 10.12737/2782-490X-2023-27-33.

5. Ismagilov KR, Kiraev RS, Shayakhmetov AS, Ismagilov RR. [Formation of spring wheat yield under climate change conditions in the Trans-Ural steppe]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2025; Vol.39. 4. 31-36 p. doi: 10.53859/02352451_2025_39_4_31.

6. Shewry PR. Wheat. *Journal of Experimental Botany*. 2009; Vol.60(6). 1537-1553 p.

7. Smolentseva EV. [Russia in the global wheat market: trends and prospects]. *Moskovskiy ekonomicheskii zhurnal*. 2019; 6. 77-86 p.

8. Safin RI, Amirov AM, Turnin SL, Nizhegorodtseva LS. [Evaluation of productivity and ecological plasticity of spring soft wheat varieties in the conditions of the Republic of Tatarstan]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015; Vol.10. 3(37). 148-151 p. doi: 10.12737/14789.

9. Valeykanin VS, Korobeynikov NI. [Combining ability and inheritance pattern of grain number of the main spike in spring bread wheat]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2025; Vol.39. 8. 33-37 p. doi: 10.53859/02352451_2025_39_8_33.

10. Besaliev IN, Panfilov AL, Reger NS. [Vegetation conditions and duration of interphase vegetation periods of spring soft wheat in dry conditions]. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2021; 4(56). 19-24 p. doi: 10.18286/1816-4501-2021-4-19-24.

11. Ageeva EV, Likhenco IE, Sovetov VV. [Evaluation of ecological plasticity of spring soft wheat varieties and lines within the framework of Kazakhstan-Siberian network program]. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020; 4(40). 7-14 p. doi: 10.48136/2222-0364 – 2020–4–40–1.

12. Zenkina KV, Aseeva TA. [Evaluation of spring soft wheat lines and varieties by selection indices]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2025; Vol.20. 1(77). 5-11 p. doi: 10.12737/2073-0462-2025-1-5-11.

13. Yakunina NA, Popolzukhina NA, Popolzukhin PV, Krotova LA. [Evaluation of spring soft wheat varieties and lines for grain yield and elements of crop structure under contrasting conditions of the southern forest-steppe of Western Siberia]. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2023; 3(51). 83-88 p.

14. Bogdan PM, Konovalova IV, Klykov AG. [Influence of abiotic factors on yield and grain quality of spring common wheat under conditions of the Primorsky territory]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2021; Vol. 35. 1. 16-20 p. doi: 10.24411/0235-2451-2021-10103.

15. Aseeva TA, Zenkina KV. [Source material of spring wheat for the ecological zone of the Middle Amur region]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2025. Vol. 39. 12. 11-16 p. – doi: 10.53859/02352451_2025_39_12_11.

16. Madyakin EV, Goryanin OI. [Research on adaptability of spring wheat varieties in the Volga region]. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2023; 1(61). 40-45 p. doi: 10.18286/1816-4501-2023-1-40-45.

17. Kilchevskiy AV, Khotyleva LV. [Method for assessing the adaptive capacity and stability of genotypes, differentiating abilities of the environment]. *Genetika*. 1985; Vol.XXI. 9. 1481-1497 p.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Кадырова Фануся Загитовна – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры общего земледелия, защиты растений и селекции Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), e-mail: fanusa51@rambler.ru, ORCID 0000-0001-7093-3269

Галимзянов Салават Фаритович - аспирант кафедры общего земледелия, защиты растений и селекции Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), специалист Филиала ФГБУ «Россельхозцентр» по Республике Татарстан (420059, Российская Федерация, г. Казань, ул. Даурская, д. 14А), e-mail: galimzyanov1999@mail.ru

Вклад авторов:

Ф.З. Кадырова — концептуализация исследования, методология, научное руководство, валидация результатов, написание и редактирование текста статьи;

С.Ф. Галимзянов — проведение полевых и лабораторных исследований, сбор и обработка данных.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 20.12.2025; одобрена после рецензирования 04.03.2026; принята к публикации 01.04.2026.

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

Authors:

Kadyrova Fanusya Zagitovna – Doctor of Agricultural Sciences, Professor of General Agriculture, Plant Protection, and Breeding Department Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: fanusa51@rambler.ru, ORCID 0000-0001-7093-3269

Galimzyanov Salavat Faritovich – post-graduate student of General Agriculture, Plant Protection and Breeding Department Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), specialist Branch of Federal State Budgetary Institution “Rosselkhoztsentr” in the Republic of Tatarstan (14A Daur'skaya Street, Kazan, 420059, Russian Federation), e-mail: galimzyanov1999@mail.ru

Contribution of the authors:

F.Z. Kadyrova – Conceptualization of the study, Methodology, Scientific supervision, Validation of results, Writing and editing the manuscript;

S.F. Galimzyanov – Conducting field and laboratory research, Data collection and processing.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 20.12.2025; revised 04.03.2026; accepted 01.04.2026.



ОЦЕНКА ОБРАЗЦОВ ХЛОПЧАТНИКА С ЦВЕТНЫМ ВОЛОКНОМ В УСЛОВИЯХ АСТРАХАНСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2026 Мягкова Е. Г., Еремин В. А., Бондаренко Т. Ю.

ФГБНУ «Прикаспийский аграрный федеральный научный центр Российской академии наук»
(с. Соленое Займище, Российская Федерация)
✉ govstan29@mail.ru

Реферат. Актуальность изучения и сохранения генетических ресурсов хлопчатника обусловлена тем, что видовое и сортовое многообразие коллекционных образцов служит основой для эффективного развития растениеводства. Цель исследований – выделение перспективных образцов хлопчатника с цветным волокном при изучении коллекционного материала Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова. Работу выполняли в 2019–2021 годы на орошаемом участке в Астраханской области. Изучали образцы хлопчатника, предоставленные Всероссийским институтом генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова, 6С с волокном светло-коричневого цвета; 1С, 10С, 11/15 и 32/3 – зеленого, С11-Ф – бежево-зеленого. Стандартом служил сорт Браун с волокном кремового цвета. Почва опытного участка – светло-каштановая, тяжелосуглинистая, содержание гумуса в слое 0...20 см составляло 1,12%. Урожайность сорта-стандарта Браун по годам варьировала от 1,5 до 4,2 т/га, 6С – от 1,6 до 3,2; 1С – от 1,3 до 2,7; 10С – от 0,5 до 2,9; С11-Ф – от 1,0 до 2,6; 11/15 – от 0,6 до 3,2 и 32/3 – от 0,7 до 2,0 т/га. В качестве самых пластичных и одновременно наиболее стабильных в разные годы изучения выделены сорт Браун и образцы 10С, 11/15.

Ключевые слова: хлопчатник (*Gossypium L.*, сем. Malvaceae), цветное волокно, урожайность, экологическая пластичность, стабильность.

Для цитирования: Мягкова Е.Г., Еремин В.А., Бондаренко Т.Ю. Оценка образцов хлопчатника с цветным волокном в условиях Астраханской области // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 44-50. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-44-50

EVALUATION OF COTTON SAMPLES WITH COLORED FIBER IN ASTRAKHAN REGION

© 2026 Myagkova E. G., Eremin V. A., Bondarenko T. Yu.

Precaspian Agrarian Federal Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
(Soleno Zaymishche village, Russian Federation)
✉ govstan29@mail.ru

Abstract. The study and conservation of cotton genetic resources is crucial because the species and varietal diversity of collection accessions serves as the basis for the effective development of crop production. The aim of this study is to identify promising cotton samples with colored fiber by examining the collection material of N.I.Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources. The study was conducted from 2019 to 2021 on an irrigated plot in Astrakhan region. Cotton samples, provided by N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources were: 6C with light-brown fiber; 1C, 10C, 11/15 and 32/3 are green, C11-F is beige-green. The standard variety was Braun with cream-colored fiber. The soil of the experimental plot was light chestnut, heavy loamy, the humus content in 0-20 cm layer was 1.12%. The productivity of Braun standard variety varied over the years from 1.5 to 4.2 t/ha, 6C - from 1.6 to 3.2; 1C - from 1.3 to 2.7; 10C - from 0.5 to 2.9; C11-F - from 1.0 to 2.6; 11/15 - from 0.6 to 3.2 and 32/3 - from 0.7 to 2.0 t/ha. Braun variety, 10C and 11/15 samples were identified as the most flexible and simultaneously most stable across the years of study.

Key words: cotton (*Gossypium L.*, Malvaceae family), colored fiber, yield, ecological flexibility, stability.

For citation: Myagkova EG, Eremin VA, Bondarenko TYu. [Evaluation of cotton samples with colored fiber in Astrakhan region]. Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2026; Vol. 21. 1(81). 44-50 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-44-50

Введение. Генетические ресурсы растений служат ключевым инструментом для селекции, обеспечивая возможность адаптации к изменяющимся климатическим условиям, противодействия новым патогенам, удовлетворения растущего спроса на сельскохозяйственную продукцию и повышения её качественных характеристик [1].

Одной из целей работы с генетическими ресурсами выступает поиск новых образцов, их агробиологическое изучение, определение выделившихся по хозяйственно ценным признакам и имеющих адаптационный потенциал к условиям возделывания [2]. Также в работе по созданию сорта предполагается не только поиск и определение перспективных

образцов, но и установление экологической ниши, то есть региона возделывания, где этот образец сможет реализовать свой потенциал [3]. Поэтому проблема поиска, изучения и использования генетических ресурсов растений в хозяйственной деятельности, конкретно, в селекционной работе, актуальна.

Культура хлопчатника имеет большое народно-хозяйственное значение, так как не только поставляет волокно для текстильной промышленности, но и служит сырьем для функционирования многих других отраслей. Экономика многих государств связана с возделыванием, переработкой и импортированием волокна хлопчатника [4]. Хлопковое волокно можно отнести к стратегическому ресурсу любой страны, поэтому важным представляется создание отечественных сортов хлопчатника, способных произрастать в южных регионах России [5].

Известно, что в природе, кроме хлопкового волокна белого цвета, встречается волокно с окраской зеленого, коричневого, бежевого, голубоватого цвета. Природно окрашенное волокно хлопчатника – это волокно с пигментацией, которое имеет оттенки разных цветов. Исторические источники сообщают о существовании коричневых цветов с розовыми и лавандовыми оттенками. Считается, что хлопок натуральной окраски возник в Америке около 5000 лет назад в Андах. Сегодня хлопок с различными оттенками волокна, в основном, происходит из доколумбовых сортов, выведенных коренными народами Южной Америки [6]. Естественный цвет обусловлен генетическими свойствами, присущими растению. Сорта хлопка с цветной окраской волокна привлекают исследователей своими экологичными и гипоаллергенными свойствами. В последние годы интенсивно изучают генетические механизмы, определяющие контроль пути биосинтеза пигментов в хлопковом волокне [7].

При окраске хлопкового волокна затрачивается много химикатов, водных и энергетических ресурсов, при этом окрашивание тканей загрязняет окружающую среду из-за использования канцерогенных химических красителей и побочных продуктов. Использование натурального цветного хлопкового волокна может сократить отходы, образующиеся в процессе окрашивания тканей и влекущие экологические угрозы [8].

Культура хлопчатника предъявляет следующие требования к температуре: сумма активных температур для раннеспелых сортов – 2900...3100, для среднеспелых – 3400 и для позднеспелых – 4000°C. Климатические условия Астраханской области с суммой активных температур 3400...3600°C позволяют возделывать раннеспелые и среднеспелые сорта хлопчатника. Одновременно с этим климат области резко-континентальный,

характеризуется засушливостью, высокой испаряемостью, наличием таких ограничивающих факторов для растений, как содержание гумуса в почве 0,7...1,5%, тяжелый гранулометрический состав почвы и ее засоленность.

В ФГБНУ «Прикаспийский аграрный федеральный научный центр Российской академии наук», находящемся на севере Астраханской области, на протяжении многих лет проводят агробиологическое изучение и оценку коллекционных образцов хлопчатника с белым и цветным волокном для использования их в селекционных целях. В 2018 году в Госсорткомиссию РФ был передан сорт хлопчатника Браун с кремовым волокном, в 2019 году – внесен в Государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию в РФ. Это первый и пока единственный сорт с естественно окрашенным волокном в Российской Федерации.

Цель исследований – выделение перспективных образцов хлопчатника с природно окрашенным волокном, обладающих высокой продуктивностью и адаптационными возможностями к почвенно-климатическим условиям Астраханской области.

Условия, материалы и методы. Работу выполняли в 2019–2021 годы. Опытные делянки были размещены на орошаемом участке Прикаспийского аграрного федерального научного центра Российской академии наук в трехкратной повторности. Изучали следующие образцы хлопчатника, предоставленные Всероссийским институтом генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова: 6С с волокном светлорозового цвета; 1С, 10С, 11/15 и 32/3 – зеленого, С11-Ф – бежево-зеленого. Стандартом служил сорт Браун с волокном кремового цвета.

Посев семян хлопчатника проводили вручную при достижении температуры почвы 15°C по схеме 0,13 м × 0,7 м. Густота стояния при этом составляла 110 тыс. раст./га. При достижении влажности почвы 70...75% НВ осуществляли полив с использованием капельного орошения. В зависимости от метеорологических условий года за 2019–2021 годы провели по 10...13 поливов с нормой 200 м³/га, оросительная норма за вегетационный период составляла 2000...2600 м³. Количество вносимых удобрений под культуру хлопчатника в условиях Астраханской области при проведении опыта: вносили при основной обработке почвы фосфорные удобрения в дозе Р₅₀. В течение вегетационного сезона хлопчатника в виде подкормок посредством фертигации проводили подкормку аммиачной селитрой (N₁₀₀) и азофоской (N₁₀₀P₁₀₀K₁₀₀) [9]. Культуру хлопчатника возделывали по зональной технологии [10], уходные работы заключались в прополках с одновременным рыхлением почвы, также

проводили чеканку растений хлопчатника (прищипывание верхушки главного побега для формирования генеративных органов). При возделывании хлопчатника в условиях Астраханской области культура в большей степени подвергается воздействию вредителей, в меньшей степени – болезней. Для уничтожения хлопковой совки при превышении экономического порога вредоносности использовали инсектициды Брейк, МЭ; Борей Нео, СК; Кораген, СК; Авант, КЭ с нормами расхода, рекомендованными производителем. Уборку хлопчатника осуществляли в несколько приемов по мере раскрытия коробочек.

Почва опытного участка – светло-каштановая, тяжелосуглинистая иловато-крупнопылевая. Содержание подвижного

фосфора и калия (по Мачигину) в слое 0...20 см составляло, соответственно, 69,0 мг/кг и 361,5 мг/кг, гумуса – 1,12%, pH солевой вытяжки – 7,6. Погодные условия в период 2019–2021 годы складывались неодинаково (табл. 1). Сумма активных температур за годы изучения была примерно одинаковой и в 2019 году составила 2842°C, в 2020 году – 2947, в 2021 году – 3148°C. Осадков выпало в 2019 году 89,8, в 2020 году – 43,2, в 2021 году – 80,0 мм. Во все годы исследований отмечали сильную засуху при величине ГТК от 0,32 до 0,15. Насыщение воздуха водяным паром также находилось на низкой отметке, о чем свидетельствует его влажность: в 2019 году самым сухим месяцем был июнь (31,8%), в 2020 году – июль (33,4%), а в 2021 году – август (35,1%).

Таблица 1 – Метеорологические условия в годы изучения хлопчатника
Table 1 — Meteorological conditions during the years of cotton plant study

Сумма температур (выше 10°C), °C				Осадки, мм				ГТК				Влажность, %			
2019	2020	2021	норма	2019	2020	2021	норма	2019	2020	2021	норма	2019	2020	2021	норма
Май (3-я декада)															
202,4	196,2	334,3	213,5	0,3	21,3	1,0	8,3	0,01	1,09	0,03	0,39	51,0	65,0	57,6	50,4
Июнь															
805,4	773,0	741,8	684,5	5,5	14,0	31,3	31,7	0,07	0,18	0,42	0,46	31,8	37,7	56,3	49,9
Июль															
742,4	869,6	863,7	777,8	59,0	0,8	24,6	23,9	0,79	0,0	0,28	0,31	53,5	33,4	40,7	48,3
Август															
719,0	712,2	768,7	740,4	7,0	7,1	6,0	18,3	0,10	0,10	0,07	0,25	41,9	45,9	35,1	46,6
Сентябрь (1,2-я декады)															
373,0	396,1	339,0	367,5	18,0	-	17,1	15,4	0,48	0,0	0,50	0,42	45,0	39,4	58,7	55,4
За вегетацию															
2842	2947	3148	2784	89,8	43,2	80,0	97,6	0,32	0,15	0,25	0,35	44,6	44,3	49,7	50,1

Закладку опыта, исследования и статистическую обработку данных проводили по следующим методическим указаниям: изучение коллекций прядильных культур (Г. Г. Давидян и др.) [11]; методика полевого опыта Б. А. Доспехова [12]. Статистическую обработку результатов осуществляли методом дисперсионного анализа. Расчеты выполняли при 5%-ном уровне значимости. Для понимания взаимосвязи между признаками использовали корреляционный анализ, средние величины изучаемых показателей за период 2019–2021 годы обрабатывали с применением MS Excel-2016.

Экологическую пластичность и стабильность определяли по методике S. A. Eberhart и W. A. Russell [13]. Кроме того, в работе использовали классификатор рода *Gossypium* L. [14].

Результаты и обсуждение. За 2019–2021 годы наибольшая урожайность образца 6С составила 3,2 т/га; 1С – 2,7; 10С – 2,9; С11-F – 2,6; 11/15 – 3,2 и 32/3 – 2,0 т/га, сорта Браун – 4,2 т/га (табл. 2). По длине волокна в 2019 году превосходили сорт-стандарт образцы 1С (33,1 мм) и 32/3 (31,6 мм); в 2020 году – все образцы, кроме 6С; в 2021 году – С11-F (34,6 мм) и 32/3 (31,7 мм). По выходу волокна превышения над сортом Браун в среднем за годы изучения не отмечали, только в 2021 году у образца 11/15 он достигал 47,2% (Браун – 34,0%). Масса одной коробочки у сорта Браун в 2019 г. составила 5,4 г, превосшел его по величине этого показателя (5,8 г) только образец 11/15; в 2020 году у всех образцов она находилась на уровне или была выше, чем у стандарта (3,7 г); в 2021 году – на одном уровне (5,3 г) или ниже.

Таблица 2 – Характеристика образцов хлопчатника по хозяйственно ценным признакам
Table 2 – Characteristics of cotton plant samples based on economically valuable traits

Сорто-образец	2019 г.				2020 г.				2021 г.			
	уро- жай ност ь, т/ га	дли- на во- локн а, мм	вы- ход во- локн а, %	мас- са 1 коро- боч- ки, г	уро- жай ност ь, т/ га	дли- на во- локн а, мм	вы- ход во- локн а, %	мас- са 1 коро- боч- ки, г	уро- жай ност ь, т/ га	дли- на во- локн а, мм	вы- ход во- локн а, %	мас- са 1 коро- боч- ки, г
Браун	1,5	31,2	35,6	5,4	4,2	30,1	36,6	3,7	1,8	31,2	34,0	5,3
6С	1,6	30,0	35,2	4,5	3,2	29,8	35,0	4,3	2,0	31,2	34,0	5,3
1С	1,3	33,1	26,7	4,1	2,0	30,3	22,4	3,7	2,7	30,0	25,9	3,7
10С	0,5	30,2	21,7	3,8	2,9	30,7	25,1	4,1	1,6	27,3	33,9	4,4
С11-Ф	2,0	29,6	26,0	4,4	2,6	30,6	28,1	4,6	1,0	34,6	23,2	3,7
11/15	0,9	30,3	24,0	5,8	3,2	30,9	29,5	4,3	0,6	29,4	47,2	4,9
32/3	0,7	31,6	25,2	4,2	2,0	32,1	30,0	5,6	0,8	31,7	23,8	4,0
Дисперсия (MS) фактора	0,60	2,14	64,75	0,53								
Дисперсия (MS) ошибки	1,15	2,13	30,08	0,41								
F _{факт.}	0,52	1,0	2,15	1,28								
F _{теор.}	2,85	2,85	2,85	2,85								

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа (фактор А – генотип, фактор В – год) свидетельствуют о том, что генетические особенности образцов не оказывали существенного воздействия на хозяйственно ценные признаки, их проявление зависело от условий среды и не учтенных факторов (табл. 3).

Таблица 3 – Доля влияния генотипа и среды на хозяйственно ценные признаки образцов хлопчатника (среднее за 2019–2021 годы), %

Table 3 – Contribution of genotype and environment to economically valuable traits of cotton plant samples (average for 2019–2021), %

	Генотип	Условия среды	Случайные факторы	F _{факт.}	F _{теор.}
Урожайность, т/га	18,32	55,97	25,71	1,43	3,0
Длина волокна, мм	30,08	0,38	69,53	0,87	3,0
Выход волокна, %	47,98	6,75	45,27	2,12	3,0
Масса одной коробочки, г	35,47	2,88	61,65	1,15	3,0

В вариацию урожайности больший вклад внесли погодные условия (55,97%), длины волокна и массы одной коробочки – случайные факторы (69,53 и 61,65%, соответственно), в вариацию выхода волокна – генотип (47,98%). Ввиду наибольшей доли случайных факторов в варьировании признаков «длина волокна» и «масса одной коробочки», можно отметить, что эти признаки были нестабильными.

Таблица 4 – Корреляционный анализ хозяйственно ценных признаков хлопчатника (среднее за 2019–2021 годы)

Table 4 – Correlation analysis of economically valuable traits in cotton plants (average for 2019–2021)

	Урожайность, т/га	Длина волокна, мм	Выход волокна, %	Масса 1 коробочки, г
Урожайность, т/га	1			
Длина волокна, мм	-0,16	1		
Выход волокна, %	0,54	-0,37	1	
Масса 1 коробочки, г	0,04	-0,08	0,82	1

Установлена прямая корреляционная зависимость между показателями «урожайность» и «выход волокна» с коэффициентом 0,54, а также «масса одной коробочки» и «выход волокна» – 0,82 (табл. 4).

При выделении образцов хлопчатника с цветным волокном важно не только

оценить хозяйственно ценные признаки, но и определить норму взаимодействия генотип-среда. Оценка селекционного материала на соответствие стрессовым условиям Астраханской области выступает обязательным приемом в адаптивной селекции [15].

Таблица 5 – Расчет параметров экологической пластичности и стабильности образцов хлопчатника

Table 5 — Calculation of parameters for ecological plasticity and stability of cotton plant samples

Сорт, образцы	Урожайность, т/га			Среднее за 2019 – 2021 гг.	b_i	Теоретическая урожайность Y_{ij} , т/га			Отклонение фактических урожаев от теоретических, т/га			$\sigma^2 d$
	2019	2020	2021			2019	2020	2021	2019	2020	2021	
Браун	1,5	4,2	1,8	2,5	1,7	1,4	4,2	1,9	0,1	0,0	-0,1	0,0
6С	1,6	3,2	2,0	2,3	0,9	1,7	3,2	1,9	-0,1	0,0	0,1	0,0
1С	1,3	2,0	2,7	2,0	0,1	1,9	2,1	2,0	-0,6	-0,1	0,7	1,0
10С	0,5	2,9	1,6	1,7	1,3	0,8	2,9	1,2	-0,3	0,0	0,4	0,3
С11-Ф	2,0	2,6	1,0	1,9	0,6	1,5	2,5	1,6	0,5	0,1	-0,6	0,7
11/15	0,9	3,2	0,6	1,6	1,5	0,6	3,1	1,0	0,3	0,1	-0,4	0,3
32/3	0,7	2,0	0,8	1,2	0,8	0,7	2,0	0,9	0,0	0,0	-0,1	0,0
Сумма	8,5	20,1	10,5	1,9								
Среднее	1,2	2,9	1,5									
Индекс условий среды	-0,6	1,0	-0,4									

Сорт-стандарт Браун оказался самым отзывчивым на изменение условий, значение b_i находилось на отметке 1,7 (табл. 5). У образцов 10С и 11/15 величина этого показателя так же превышала 1 (1,3 и 1,5, соответственно). Можно предположить, что при улучшении агротехники он будут демонстрировать большую урожайность, их целесообразно возделывать на интенсивном агрофоне. Образцы 1С и С11-Ф с коэффициентами регрессии, соответственно, 0,1 и 0,6 слабо реагировали на изменение условий возделывания, они подходят для экстенсивного фона возделывания.

Сорт Браун и образцы 6С и 32/3 демонстрировали стабильность в разные по условиям годы ($\sigma^2 d=0$). Менее стабильными оказались образцы 10С и 11/15 ($\sigma^2 d = 0,3$), нестабильными – 1С, С11-Ф.

Выводы. В засушливых условиях 2019–2021 годы (ГТК 0,15...0,32) для исследуемых образцов выявлена положительная корреляционная связь между признаками «урожайность» и «выход волокна» ($r=0,54$), а также «масса одной коробочки» и «выход волокна» ($r=0,82$). Можно предположить, что для увеличения урожайности целесообразно вести селекцию в направлении увеличения

выхода волокна.

Коэффициенты регрессии (b_i) для образцов 10С, 11/15 и сорта-стандарта Браун превышали 1 (1,3; 1,5 и 1,7, соответственно), что указывает на их способность увеличивать урожайность при возделывании на интенсивном фоне. Кроме того, они характеризовались невысокой величиной дисперсии ($\sigma^2 d$ до 0,3), то есть стабильностью в разных условиях. Выделенные образцы хлопчатника с цветным волокном 10С и 11/15 могут быть использованы в дальнейшей работе по созданию сортов для условий Астраханской области.

Сведения о финансировании. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Прикаспийский аграрный федеральный научный центр РАН» (тема № FNMW-2025-0004 «Провести комплексное изучение генетических ресурсов зерновых, технических и масличных культур, выделить источники хозяйственно ценных признаков для создания высокопродуктивных адаптированных к аридным условиям Северного Прикаспия сортов отечественной селекции»). Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Литература

- Хлесткина Е. К., Чухина И. Г. Генетические ресурсы растений: стратегия сохранения и использования // Вестник Российской академии наук. 2020. Т 90. № 6. С. 522–527. doi: 10.31857/S0869587320060043.
- Подольная Л. П., Григорьев С. В., Мягкова Е. Г. Образцы коллекции хлопчатника ВИР различного происхождения для селекции в условиях Северного Прикаспия // Биотехнология и селекция растений. 2023. Т. 6. № 4. С. 93–102. doi: 10.30901/2658-6266-2023-4-03.
- Особенности экологических требований хлопчатника к условиям произрастания / А. Н. Бабичев, Р. Е. Юркова, С. А. Селицкий и др. // Экология и водное хозяйство. 2023. Т. 5. № 2. С. 26–39. doi: 10.31774/2658-7890-2023-5-2-26-39.
- Нестеренко Г. И. Экологические испытания сортов хлопчатника из Ирана в Астраханской области //

Вестник КрасГАУ. 2020. № 9 (162). С. 36–40. doi: 10.36718/1819-4036-2020-9-36-40.

5. Баймухаметова Э. А. Хлопчатник: особенности культуры, перспективы создания трансгенных отечественных сортов и их выращивания в России // Биомика. 2016. Т. 8. № 3. С. 275–288.

6. Physiological characteristics associated with fiber development in two naturally colored cotton cultivars / X. Zhang, L. P. Pan, M. Du, et al. // Agronomy Journal. 2019. Vol. 111. No. 3. P. 1190–1197. doi: 10.2134/ agronj2018.03.0166.

7. Candidate Genes for Brown Fiber in Cotton Revealed Among the R2R3-Myb and bHLH-Myc Gene Families / A. S. Mikhailova, N. A. Shvachko, L. P. Podolnaya, et al. // Journal of Natural Fibers. 2024. Vol. 21. No. 1. URL: doi: 10.1080/15440478.2024.2399930 (дата обращения: 27.01.2026).

8. Туз Р. К., Асфандиярова М. Ш., Подольная Л. П. Браун – первый российский сорт хлопчатника с природноокрашенным волокном // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2023. Т. 184. № 1. С. 154–162. doi: 10.30901/2227-8834-2023-1-154-162.

9. Токарев Н. А., Бочарникова Л. С., Нестеренко Г. И. Особенности агротехнических мероприятий на элитно-семеноводческих посевах хлопчатника в условиях Астраханской области // Орошаемое земледелие. 2019. № 2. С. 54–57.

10. Рекомендации по технологии возделывания хлопчатника на орошаемых землях юга России. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2025. 72 с.

11. Давидян Г. Г., Другова И. Ф., Кутузова С. Н. Изучение коллекций прядильных растений (хлопчатник, лен, конопля): методические указания. Л.: ВИР, 1978. С. 3–6.

12. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). Изд. 6-е, стер., перепеч. с 5-го изд. М.: Альянс, 2011. 352 с.

13. Eberhart S. A., Russell W. A. Stability parameters for comparing varieties // Crop Science. 1966. Vol. 6. No. 1. P. 36–40.

14. Корнейчук В. А. Классификатор рода *Gossypium* L. (хлопчатник) / Л.: Всесоюзный НИИ растениеводства им. Н.И. Вавилова (ВИР), 1982. 16 с.

15. Децына А.А., Илларионова И.В., Щербинина В.О. Расчет параметров экологической пластичности и стабильности масличных сортов подсолнечника селекции ВНИИМК // Масличные культуры. 2020. Вып. 3 (183). С. 31–38.

References

1. Khlestkina EK, Chukhina IG. [Plant genetic resources: conservation and use strategy]. Vestnik Rossiyskoy akademii nauk. 2020; Vol.90. 6. 522–527 p. doi: 10.31857/S0869587320060043.

2. Podolnaya LP, Grigorev SV, Myagkova EG. [Cotton collection samples of various origins, provided by N.I.Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources for breeding in Northern Caspian region]. Biotekhnologiya i selektsiya rasteniy. 2023; Vol.6. 4. 93–102 p. doi: 10.30901/2658-6266-2023-4-o3.

3. Babichev AN, Yurkova RE, Selitskiy SA. [Features of ecological requirements of cotton to growing conditions]. Ekologiya i vodnoe khozyaystvo. 2023; Vol.5. 2. 26–39 p. doi: 10.31774/2658-7890-2023-5-2-26-39.

4. Nesterenko GI. [Ecological testing of cotton varieties from Iran in Astrakhan region]. Vestnik KrasGAU. 2020; 9 (162). 36–40 p. doi: 10.36718/1819-4036-2020-9-36-40.

5. Baymukhametova EA. [Cotton: crop features, prospects for creating transgenic domestic varieties and their cultivation in Russia]. Biomika. 2016; Vol.8. 3. 275–288 p.

6. Zhang X, Pan LP, Du M. Physiological characteristics associated with fiber development in two naturally colored cotton cultivars. Agronomy Journal. 2019; Vol.111. No.3. 1190–1197 p. doi: 10.2134/ agronj2018.03.0166.

7. Mikhaylova AS, Shvachko NA, Podolnaya LP. Candidate genes for Brown fiber in cotton revealed among the R2R3-Myb and bHLH-Myc gene families. [Internet]. Journal of Natural Fibers. 2024; Vol.21. No.1. [cited 2026, January 27]. Available from: doi: 10.1080/15440478.2024.2399930.

8. Tuz RK, Asfandiyarova MSh, Podolnaya LP. [Braun – the first Russian cotton variety with naturally colored fiber]. Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii. 2023; Vol.184. 1. 154–162 p. doi: 10.30901/2227-8834-2023-1-154-162.

9. Tokarev N. A., Bocharnikova L. S., Nesterenko G. I. Features of agro-technical measures on elite seed-growing cotton crops in the Astrakhan region // Irrigated agriculture. 2019. No. 2. pp. 54–57.

10. Recommendations on the technology of cotton cultivation on irrigated lands of southern Russia. Moscow: Rosinformagrotech, 2025. 72 p.

11. Davidyan G. G., Drugova I. F., Kutuzova S. N. Study of collections of medicinal plants (cotton, flax, hemp): methodological guidelines. L.: VIR, 1978. pp. 3–6.

12. Dospekhov B. A. Methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results). 6th ed., ster., reprinted from the 5th ed. M.: Alliance, 2011. 352 p.

13. Eberhart S. A., Russell W. A. Stability parameters for comparing varieties // Crop Science. 1966. Vol. 6. No. 1. P. 36–40.

14. Korneychuk V. A. Classifier of the genus *Gossypium* L. (cotton) / L.: All-Union Research Institute of Plant Breeding named after N.I. Vavilov (VIR), 1982. 16 pages.

15. Decyna A.A., Illarionova I.V., Shcherbinina V.O. Calculation of parameters of ecological plasticity and stability of sunflower oil varieties of VNIIMK breeding // Oilseed crops. 2020. Issue 3 (183). pp. 31–38.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Мягкова Елена Георгиевна – научный сотрудник, врио зав. лаб. технических и масличных культур ФГБНУ «Прикаспийский аграрный федеральный научный центр Российской академии наук» (416251, Российская Федерация, Астраханская область, с. Соленое Займище, квартал Северный, д. 8), e-mail: govshan29@mail.ru, ORCID 0000-0002-0631-9253

Ерёмин Владимир Александрович – младший научный сотрудник лаборатории технических и масличных культур ФГБНУ «Прикаспийский аграрный федеральный научный центр Российской академии наук» (416251, Российская Федерация, Астраханская область, с. Соленое Займище, квартал Северный, д. 8),

e-mail: ereminvladimir1975@gmail.com, ORCID 0009-0000-5967-848X

Бондаренко Татьяна Юрьевна – младший научный сотрудник лаборатории технических и масличных культур ФГБНУ «Прикаспийский аграрный федеральный научный центр Российской академии наук» (416251, Российская Федерация, Астраханская область, с. Солёное Займище, квартал Северный, д. 8), e-mail: tokur80@mail.ru, ORCID 0009-0004-4289-1996

Вклад авторов:

Е.Г. Мягкова – разработка концепции, разработка методологии, написание черновика рукописи;

В.А. Еремин – анализ литературных источников, сбор данных, апробация методик и проведение исследования;

Т.Ю. Бондаренко – рецензирование, редактирование текста статьи, устранение ошибок, улучшение формулировок.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 29.04.2025; одобрена после рецензирования 31.03.2026; принята к публикации 01.04.2026.

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

Authors:

Myagkova Elena Georgievna – researcher, Acting Head of Industrial and Oilseed Crops Laboratory Precaspian Agrarian Federal Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, (8 Kvartal Severny str., s. Solenoe Zajmishhe, Astrakhan region, Russian Federation, 416251), e-mail: govstan29@mail.ru, ORCID 0000-0002-0631-9253

Eremin Vladimir Aleksandrovich – junior researcher of Industrial and Oilseed Crops Laboratory Precaspian Agrarian Federal Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, (8 Kvartal Severny str., s. Solenoe Zajmishhe, Astrakhan region, Russian Federation, 416251), e-mail: ereminvladimir1975@gmail.com, ORCID 0009-0000-5967-848X

Bondarenko Tatyana Yurevna – junior researcher of Industrial and Oilseed Crops Laboratory Precaspian Agrarian Federal Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, (8 Kvartal Severny str., s. Solenoe Zajmishhe, Astrakhan region, Russian Federation, 416251), e-mail: tokur80@mail.ru, ORCID 0009-0004-4289-1996

Contribution of the authors:

E.G. Myagkova – Concept development, Methodology development, Writing a draft manuscript;

V.A. Eremin – Analysis of literary sources, Data collection, Approbation of methods and research;

T.Y. Bondarenko – Reviewing, editing the text of the article, Correcting errors, Improving the wording.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 29.04.2025; revised 31.03.2026; accepted 01.04.2026.



ФОРМИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ И КАЧЕСТВА ЗЕРНА ЯРОВОЙ МЯГКОЙ ПШЕНИЦЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ФИЗИОЛОГИИ РАСТЕНИЙ

© 2026 Николаев П. Н., Юсова О. А. ✉, Шулико Н. Н., Тукмачева Е. В.

Омский аграрный научный центр
(г. Омск, Российская Федерация)
✉ yusova@anc55.ru

Реферат. Формирование урожайности начинается с фазы прорастания семян и происходит в течение всего периода вегетации. Естественными процессами растений выступают нарастание площади листовой поверхности и накопление сухой биомассы, из этих показателей складывается фотосинтетический потенциал растений и, в дальнейшем, продуктивность. Цель исследований – оценка формирования урожайности и качества зерна яровой мягкой пшеницы в зависимости от развития растений в фазе кущения. Работу выполняли в 2023–2025 годы в полевом опыте в южной лесостепи Омской области. По уровню влагообеспеченности 2023 год характеризовался как засушливый, 2024 и 2025 годы – переувлажненные. Объект исследований – сорт яровой мягкой пшеницы Тарская 12 (включен в Госреестр РФ в 2023 год). Масса зерна с колоса, урожайность и содержание белка в зерне яровой мягкой пшеницы находились в сильной прямой зависимости от площади листа и общей ассимиляционной поверхности растений в фазе кущения ($r = 0,817...0,998$) и в обратной с накоплением сухой надземной биомассы ($r = -0,954...0,999$), что свидетельствует о конкуренции между накоплением сухого вещества в вегетативной и генеративной частях. Полученные результаты свидетельствуют, что рост растений яровой мягкой пшеницы в начальный период развития оказывал значительное влияние на формирование качественных и урожайных свойств сорта Тарская 12.

Ключевые слова: пшеница (*Triticum aestivum* L.), лист, биомасса, белок, урожайность, сопряженность.

Для цитирования: Формирование урожайности и качества зерна яровой мягкой пшеницы в зависимости от физиологии растений / П.Н. Николаев, О.А. Юсова, Н.Н. Шулико, Е.В. Тукмачева // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 51-56 doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-51-56

YIELD AND GRAIN QUALITY DEVELOPMENT OF SPRING SOFT WHEAT DEPENDING ON PLANT PHYSIOLOGY

© 2026 Nikolaev P. N., Yusova O. A. ✉, Shuliko N. N., Tukmacheva E. V.

Omsk Agrarian Scientific Center
(Omsk, Russian Federation)
✉ yusova@anc55.ru

Abstract. Yield development begins with seed germination and continues throughout the growing season. Natural plant processes include an increase in leaf area and accumulation of dry biomass; these factors determine the photosynthetic potential of plants and, subsequently, productivity. The aim of study was to evaluate the yield and grain quality development of spring soft wheat depending on plant development during the tillering stage. The study was conducted from 2023 to 2025 in a field experiment in the southern forest-steppe of Omsk region. In terms of moisture availability, 2023 was characterized as dry, while 2024 and 2025 were waterlogged. The object of study was the spring soft wheat of Tarskaya 12 variety (included in State Register of the Russian Federation in 2023). Grain weight per ear, yield and protein content in spring soft wheat grain were strongly directly dependent on the leaf area and the total assimilation surface of plants at the tillering stage ($r = 0.817...0.998$) and inversely with the accumulation of dry aboveground biomass ($r = -0.954...0.999$), indicating competition between the accumulation of dry matter in vegetative and generative parts. The obtained results indicate that early spring soft wheat plant growth significantly influenced the development of quality and yield characteristics of Tarskaya 12 variety.

Key words: wheat (*Triticum aestivum* L.), leaf, biomass, protein, yield, conjugation.

For citation: Nikolaev PN, Yusova OA, Shuliko NN, Tukmacheva EV. [Yield and grain quality development of spring soft wheat depending on plant physiology]. Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2026; Vol. 21. 1(81). 51-56 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-51-56

Введение. Современные методы производства семенного материала яровой пшеницы включают в себя многие факторы, научная обоснованность которых включает такие аспекты, как биотехнология, физиология растений, агрономия и др. [1]. Формирование урожайности начинается с фазы прорастания семян и происходит в течение всего периода вегетации. Естественными процессами растений служат нарастание площади листовой поверхности и накопление сухой биомассы – из этих показателей складывается фотосинтетический потенциал растений. Наблюдения за этими процессами по фенологическим фазам и их стимуляция способствуют повышению накоплению пластических веществ, которые затем переходят в зерно колоса, формируя урожайные и качественные показатели [2, 3].

Помимо широкого применения средств химизации [4], на повышение урожайности также значительное влияние оказывают метеорологические условия в каждый конкретный межфазный период [5].

Цель исследований – оценка формирования урожайности и качества зерна яровой мягкой пшеницы в зависимости от развития растений в фазе кущения.

Условия, материалы и методы. Работу выполняли в 2023–2025 годы в полевом опыте лаборатории мягкой пшеницы селекционно-семеноводческого центра ФГБНУ «Омский АНЦ» в южной лесостепной зоне Омского Прииртышья. Координаты расположения опытного участка: 55.03056° северной широты и 73.33611° восточной долготы. Объект исследований – сорт яровой мягкой пшеницы Тарская 12 (включен в госреестр селекционных достижений РФ в 2023 году).

Почва опытного участка – лугово-черноземная среднесуглинистая с содержанием в пахотном (0...20 см) слое гумуса – 6,5% (по Тюрину), общего азота – 0,30% (по Кьельдалю),

нитратного азота – менее 9,8 мг/кг (очень низкое), подвижного фосфора и калия (по Чирикову) – соответственно 122 (высокое) и 300 (очень высокое) мг/кг, рНводн. – 6,6.

Обработки почвы – отвальная (ежегодная вспашка на глубину 20...22 см). Комплекс весенне-полевых работ включал обработку почвы тяжелыми зубowymi боронами в 2 следа, перед посевом – культиватором Степняк 5.6. Посев культур выполнен сеялкой ССФК-7 с нормой высева 4,5 млн всхожих семян на 1 га, с прикатыванием кольчатыми катками. Защиту растений пшеницы от сорняков осуществляли рекомендованными препаратами. Нормы и сроки обработки посевов применяли в соответствии с рекомендациями [6].

Учет урожая в фазе полной спелости осуществляли прямым комбайнированием комбайном Wintersteiger Classic 29 августа. Урожай приводили к 100% чистоте и 14% влажности. Содержание белка в зерне определяли с использованием анализатора «ИнфрАлюм ФТ» на основании документа, регламентирующего методику испытаний М 04-37-2009.

В фазе кущения растений яровой мягкой пшеницы рассчитывали площадь листа, общую ассимиляционную поверхность и накопление сухой надземной биомассы [7]. Сопреженность урожайности и содержания белка с величинами этих показателей определяли корреляционным методом [8].

Годы проведения исследований характеризовались контрастными условиями тепло- и влагообеспеченности (рис. 1, 2). По уровню влагообеспеченности 2023 год характеризовался как засушливый (ГТК = 0,84), однако он был очень контрастным по декадам – от отсутствия осадков (I декада мая и II сентября) до их избытка (III декада июня – 150,4% к среднесуточным данным). Повышенные температуры воздуха в 2023 году отмечены с мая по июль (превышение среднесуточных данных от +0,6 до +3,0°C); в 2024 году – только в июле (на 2,1°C).

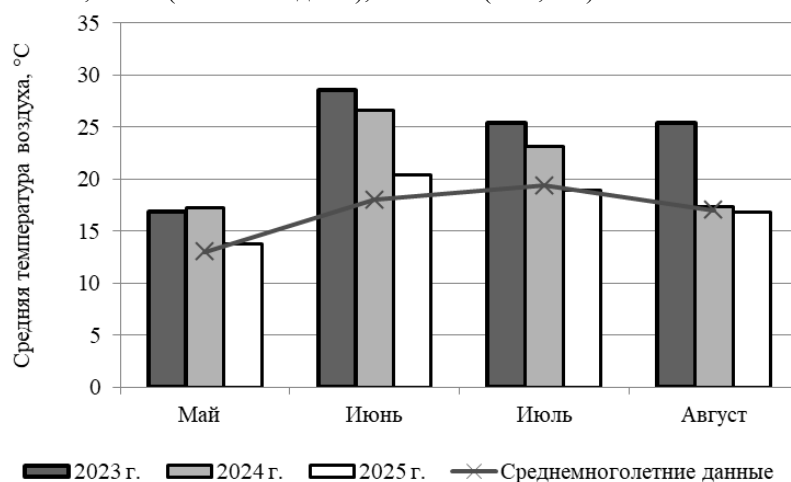


Рис. 1 – Метеоусловия вегетационных периодов по данным Омской ГМС: средняя температура воздуха, °C

Fig. 1 – Weather conditions during the growing seasons according to the Omsk State Meteorological Station (GMS): average air temperature, °C

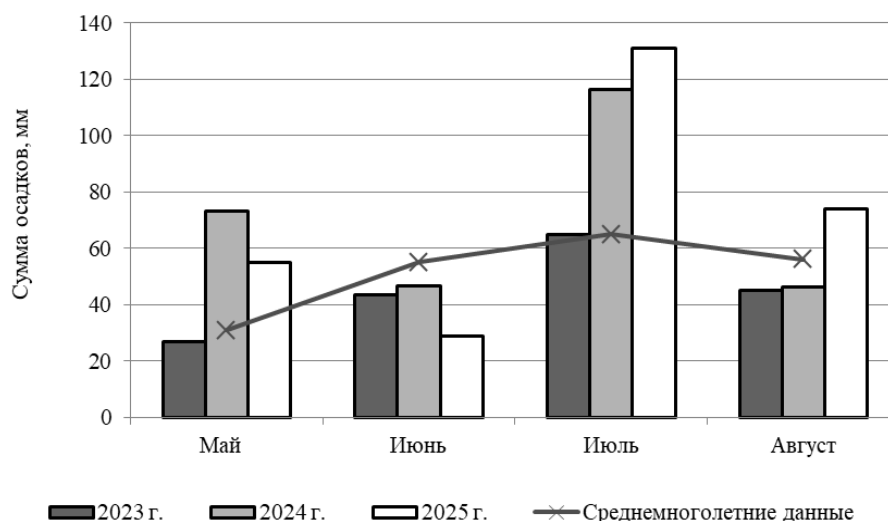


Рис. 2 – Метеоусловия вегетационных периодов по данным Омской ГМС: сумма осадков, мм.

Fig. 2 – Weather conditions during the growing seasons according to the Omsk State Meteorological Station (GMS): total precipitation, mm.

В 2024 году зафиксировано переувлажнение (ГТК=1,63). Значительное количество осадков отмечено с мая по август (выше нормы на 37,7...191,0 мм, что составляет 150,7...426,2%). За период май-сентябрь 2025 год средняя температура воздуха составила 16,2°C (+0,8°C к средней многолетней), сумма осадков – 307,5 мм (132% к норме), ГТК=1,25. Погода отличалась большой контрастностью – от засушливых условий до значительного переувлажнения. Третья декада мая характеризовалась превышением среднемноголетних данных по температуре воздуха (+4,1°C) и по сумме осадков (+30,0 мм, 146%). В июне (период всходов, кущения) средние температуры также превышали норму на 6,5°C, при сумме осадков, близкой к среднемноголетней (90%).

Результаты и обсуждение. Важность функций листа в жизнедеятельности растений

сложно переоценить: в этом органе осуществляются процессы фотосинтеза, накапливаются пластические вещества; строение и размер листовой пластины оказывает непосредственное влияние на формирование урожайности [9]. Согласно проведенным исследованиям, повышение площади ассимиляционной поверхности листьев положительно влияет на фотосинтетический потенциал посева, чистую продуктивность фотосинтеза и, как следствие, на урожайность. Согласно данным наших исследований, в фазе кущения средняя площадь листа яровой мягкой пшеницы варьировала от 1,10 см² в 2024 году до 3,38 см² в 2025 году; средняя площадь листа составляла 2,06 см² (табл. 1). Коэффициент вариации значительный (CV = 27,37%), что означает сильную изменчивость этого показателя по годам.

Таблица 1 – Характеристика роста и развития сорта яровой мягкой пшеницы Тарская 12 по фенологическим фазам

Table 1 – Growth and development characteristics of the spring soft wheat variety Tarskaya 12 by phenological stages

Показатель	2023 г.	2024 г.	2025 г.	$\bar{x}$	HCP ₀₅	CV, %
Кущение						
Средняя площадь листа, см ²	1,7	1,10	3,38	2,06	0,98	27,37
Общая ассимиляционная поверхность, см ² /раст.	5,2	5,30	15,92	8,81	3,00	29,95
Сухая надземная биомасса, г	0,40	0,63	0,65	0,56	0,23	18,08
Полная спелость						
Содержание белка в зерне на абсолютно сухое вещество, %	17,5	17,1	22,1	18,9	1,10	8,68
Масса зерна с колоса, г	0,74	0,66	0,91	0,70	0,43	9,58
Урожайность, т/га	3,69	3,61	2,40	3,23	0,30	6,98

Аналогично площади листа изменяется и общая ассимиляционная поверхность растений. Минимальное значение этого показателя отмечено в 2023 году ($5,2 \text{ см}^2/\text{раст.}$), максимальное – в 2025 году ($15,92 \text{ см}^2/\text{раст.}$), среднее за годы исследований – $8,81 \text{ см}^2/\text{раст.}$ Изменчивость признака значительна ($CV = 29,95\%$). Площадь ассимиляционной поверхности выступает очень динамичным показателем, сильно меняется в онтогенезе в зависимости от морфофизиологических характеристик генотипов и донорно-акцепторных отношений.

В нашем эксперименте сухая надземная биомасса растений составила $0,56 \text{ г/раст.}$ Самая высокая в опыте величина этого показателя отмечена в 2025 году ($0,65 \text{ г/раст.}$), а самое низкое – в 2023 году ($0,40 \text{ г/раст.}$). Изменчивость этого признака средняя ($CV = 18,08\%$).

Среднее содержание белка в зерне сорта яровой мягкой пшеницы Тарская 12 находилось на уровне $18,9\%$; продукция 2025 года характеризовалась как высокобелковая ($22,1\%$). Незначительная изменчивость этого признака ($CV = 8,68\%$) позволяет судить о

его генетическом контроле.

В селекции на урожайность зерновых культур важную роль отводят повышению продуктивности колоса. Положительный вклад массы зерна с колоса в урожайность зерна отмечали многие исследователи [10]. Средняя величина этого показателя составила $0,70 \text{ г}$ (при $CV = 9,58\%$). Урожайность яровой мягкой пшеницы в среднем за 2023–2025 годы находилась на уровне $3,23 \text{ т/га}$ ($CV = 5,47\%$). Достоверных различий по этим признакам за годы исследований не наблюдали.

По результатам корреляционного анализа (рис. 3) отмечена сильная прямая корреляция урожайности, массы зерна колоса и содержания в зерне белка с площадью листа и общей ассимиляционной поверхностью растений в фазе кущения ($r = 0,817...0,998$) и обратная с накоплением сухой надземной биомассы ($r = -0,954...0,999$). Полученные данные свидетельствуют о конкуренции между накоплением сухого вещества в вегетативной и генеративной частях растений, что подтверждается другими исследователями [11].

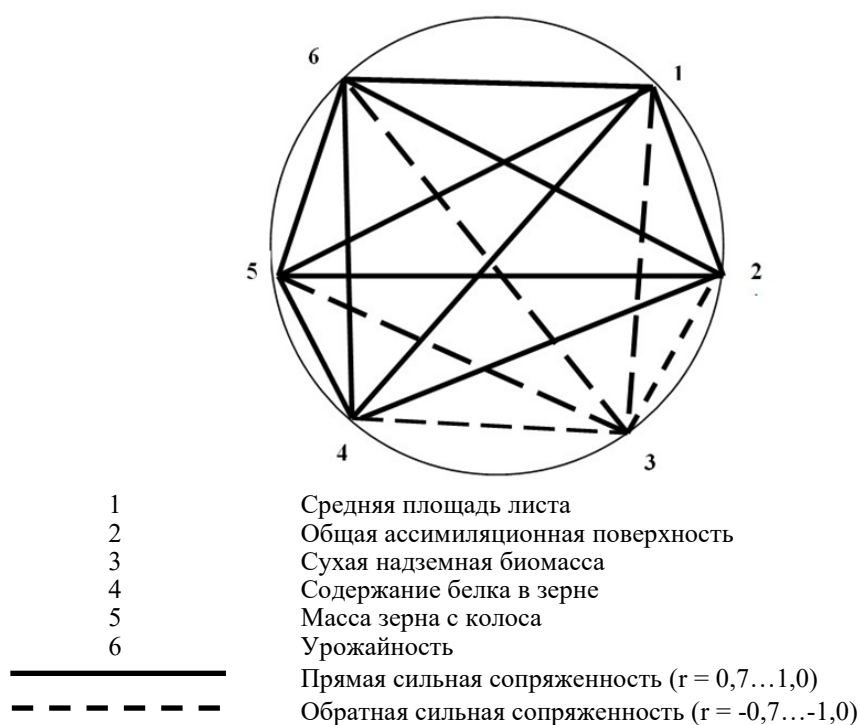


Рис. 3 – Корреляционная взаимосвязь основных показателей развития растений яровой мягкой пшеницы (фаза кущения), урожайности и качества зерна

Fig. 3 – Correlation relationship between the main development indicators of spring soft wheat plants (tillering stage), yield, and grain quality

Выводы. Основные показатели роста и развития растений сорта яровой мягкой пшеницы Тарская 12 в фазе кущения сильно варьировали в зависимости от условий года ($CV > 20\%$). Масса зерна колоса, урожайность и содержание белка в зерне яровой мягкой пшеницы находились в сильной прямой зависимости от площади листа и общей ассимиляционной поверхности растений в фазе кущения ($r = 0,817...0,998$), при обратной

корреляции с накоплением сухой надземной биомассы ($r = -0,954...0,999$).

Сведения о финансировании. Работа выполнена в рамках реализации мероприятий, соответствующих программе «Создание селекционно-семеноводческих центров в области сельского хозяйства для создания и внедрения в агропромышленный комплекс современных технологий на основе собственных разработок научных и образовательных

организаций», в целях достижения результата Федерального проекта «Реализация Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства и научное обеспечение развития отраслей агропромышленного комплекса» государственной программы

Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации», в рамках исполнения соглашения о предоставлении из Федерального бюджета грантов в форме субсидий № 075-15-2025-192 от 17.04.2025 года.

Литература

1. Продуктивность агроценозов и качество зерна пшеницы в зависимости от обработки почвы и средств интенсификации / В. И. Усенко, С. В. Усенко, В. П. Олешко и др. // Земледелие. 2018. №8. С. 30–33. doi:10.24411/0044-3913-2018-10809.
2. Шайдаюк Е. Л., Юсов В. С., Гульяева Е. И. Популяционные исследования возбудителя бурой ржавчины на твердой пшенице в Омской области // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2019. № 54. С. 64–69.
3. Curtis T., Halford N. G. Food security: the challenge of increasing wheat yield and the importance of not compromising food safety // Annals of Applied Biology. 2014. Vol. 164. No. 3. P. 354–372. doi: 10.1111/aab.12108.
4. Ravindra Korake S. Sh., Bharad R. Effect of balance dose of fertilizers and irrigation on yield and yield component of wheat cultivar // International journal of current microbiology and applied sciences. 2021. Vol. 10. No. 4. P. 860–868. doi: 10.20546/ijemas.2021.1004.090.
5. Влияние метеорологических условий на урожайность сортов яровой пшеницы в условиях Западного Казахстана / В. И. Цыганков, Б. Е. Губашева, А. В. Цыганков и др. // Наука и образование. 2023. № 3-2 (72). С. 107–117. doi: 10.52578/2305-9397-2023-3-2-107-117.
6. Доронин В. Г., Ледовский Е. Н. Обзор распространения сорняков на полях Омской области и основные меры борьбы с ними в 2020 году // Обзор фитосанитарного состояния посевов сельскохозяйственных культур Омской области в 2019 году и прогноз развития вредных объектов в 2020 году. Омск: М-во сел. хоз-ва Рос. Фед., Рос. с.-х. центр по Ом. обл., 2018. С. 116–124.
7. Аникеев В. В., Кутузов Ф. Ф. Новый способ определения площади листовой поверхности у злаков // Физиология растений. 1961. Т. 8. Вып. 3. С. 375–377.
8. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
9. Спектральные характеристики сортов пшеницы при биотическом стрессе / Т. А. Гурова, Д. Н. Клименко, О. С. Луговская и др. // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33. № 10. С. 71–75.
10. Сравнительное изучение сортов твердой пшеницы по элементам продуктивности и пластичности / М. Н. Кирьякова, М. Г. Евдокимов, В. С. Юсов и др. // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2019. № 3 (52). С. 33–39. doi: 10.31677/2072-6724-2019-52-3-33-39.
11. Юсова О. А., Белан И. А. Фотосинтетическая активность и продуктивность яровой мягкой пшеницы среднеранней группы спелости питомника КАСИБ в условиях южной лесостепи Западной Сибири // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 3. С. 103–108. doi: 10.18286/1816-4501-2018-3-103-109.

References

1. Usenko VI, Usenko SV, Oleshko V P. [Productivity of agroecosystems and quality of wheat grain depending on soil cultivation and intensification means]. Zemledele. 2018; 8. 30-33 p. doi:10.24411/0044-3913-2018-10809.
2. Shaydayuk EL, Yusov VS, Gulyaeva EI. [Population studies of the causative agent of brown rust on durum wheat in Omsk region]. Izvestiya Sankt-Petersburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2019; 54. 64-69 p.
3. Curtis T, Halford NG. Food security: the challenge of increasing wheat yield and the importance of not compromising food safety. Annals of Applied Biology. 2014; Vol.164. No.3. 354-372 p. doi: 10.1111/aab.12108.
4. Ravindra Korake SSH, Bharad R. Effect of balance dose of fertilizers and irrigation on yield and yield component of wheat cultivar. International journal of current microbiology and applied sciences. 2021; Vol.10. No.4. 860-868 p. doi: 10.20546/ijemas.2021.1004.090.
5. Tsygankov VI, Gubasheva BE, Tsygankov AV. [Influence of meteorological conditions on spring wheat varieties productivity in Western Kazakhstan]. Nauka i obrazovanie. 2023; 3-2 (72). 107-117 p. doi: 10.52578/2305-9397-2023-3-2-107-117.
6. Doronin VG, Ledovskiy EN. Obzor fitosanitarnogo sostoyaniya posevov sel'skokhozyaystvennykh kultur Omskoy oblasti v 2019 godu i prognoz razvitiya vrednykh obektov v 2020 godu. [Review of weed distribution in the fields of Omsk region and main measures to combat them in 2020]. Omsk: M-vo sel. khoz-va Ros. Fed., Ros. s.-kh. tsentr po Om. obl. 2018; 116-124 p.
7. Anikeev VV, Kutuzov FF. [A new method for determining leaf surface area of cereal crops]. Fiziologiya rasteniy. 1961; Vol.8. Issue 3. 375-377 p.
8. Dospekhov BA. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy). [Methodology of field experiments (with the basics of statistical processing of research results)]. 5-e izd., pererab. i dop. Moscow: Agropromizdat. 1985; 351 p.
9. Gurova TA, Klimenko DN, Lugovskaya OS. [Spectral characteristics of wheat varieties under biotic stress]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2019; Vol.33. 10. 71-75 p.
10. Kiryakova MN, Evdokimov MG, Yusov VS. [Comparative study of durum wheat varieties by productivity and plasticity elements]. Vestnik NGAU (Novosibirskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet). 2019; 3 (52). 33-39 p. doi: 10.31677/2072-6724-2019-52-3-33-39.
11. Yusova OA, Belan IA. [Photosynthetic activity and productivity of spring soft wheat of mid-early maturity group of KASIB nursery in the conditions of southern forest-steppe of Western Siberia]. Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii. 2018; 3. 103-108 p. doi: 10.18286/1816-4501-2018-3-103-109.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Николаев Петр Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, зав. лабораторией селекции зернофуражных культур Омского аграрного научного центра (644012, Российская Федерация, г. Омск, пр-кт Королева, д.26), e-mail: nikolaev@anc55.ru, ORCID 0000-0002-5192-2967

Юсова Оксана Александровна – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, зав. лабораторией биохимии и физиологии растений Омского аграрного научного центра (644012, Российская Федерация, г. Омск, пр-кт Королева, д.26), e-mail: yusova@anc55.ru, ORCID 0000-0003-3679-8985

Шулико Наталья Николаевна – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, зав. лабораторией микробиологии Омского аграрного научного центра (644012, Российская Федерация, г. Омск, пр-кт Королева, д.26), e-mail: shuliko@anc55.ru, ORCID 0000-0001-5641-434X

Тукмачева Елена Васильевна – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории микробиологии Омского аграрного научного центра (644012, Российская Федерация, г. Омск, пр-кт Королева, д.26), e-mail: tukmacheva@anc55.ru, ORCID 0000-0002-1312-3881

Вклад авторов:

П.Н. Николаев – валидация, курирование данных, написание – рецензирование и редактирование, научное руководство;

О.А. Юсова – концептуализация, методология, написание – первоначальный вариант текста, визуализация, управление проектом;

Н.Н. Шулико – проведение исследований;

Е.В. Тукмачева – проведение исследований.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 04.07.2025; одобрена после рецензирования 31.03.2026; принята к публикации 01.04.2026.

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

Authors:

Nikolaev Petr Nikolaevich – Ph.D. of Agricultural Sciences, leading researcher, Head of Forage Crop Breeding Laboratory Omsk Agrarian Scientific Center (26 Koroleva Avenue, Omsk, 644012, Russian Federation), e-mail: nikolaev@anc55.ru, ORCID 0000-0002-5192-2967

Yusova Oksana Aleksandrovna – Ph.D. of Agricultural Sciences, leading researcher, Head of Plant Biochemistry and Physiology Laboratory Omsk Agrarian Scientific Center (26 Koroleva Avenue, Omsk, 644012, Russian Federation), e-mail: yusova@anc55.ru, ORCID 0000-0003-3679-8985

Shuliko Natalya Nikolaevna – Ph.D. of Agricultural Sciences, leading researcher, Head of Microbiology Laboratory Omsk Agrarian Scientific Center (26 Koroleva Avenue, Omsk, 644012, Russian Federation), e-mail: shuliko@anc55.ru, ORCID 0000-0001-5641-434X

Tukmacheva Elena Vasilevna – Ph.D. of Agricultural Sciences, leading researcher of Microbiology Laboratory Omsk Agrarian Scientific Center (26 Koroleva Avenue, Omsk, 644012, Russian Federation), e-mail: tukmacheva@anc55.ru, ORCID 0000-0002-1312-3881

Contribution of the authors:

P.N. Nikolaev – Validation, Data curation, Writing — review & Editing, Supervision;

O.A. Yusova – Conceptualization, Methodology, Writing — original draft, Visualization, Project administration;

N.N. Shuliko – Investigation;

E.V. Tukmacheva – Investigation.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 04.07.2025; revised 31.03.2026; accepted 01.04.2026.



ОБОСНОВАНИЕ РАБОЧИХ ОРГАНОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ЗАКЛАДКИ НА ХРАНЕНИЕ КАРТОФЕЛЯ

© 2026 Дорохов А. С., Сибирёв А. В. ✉, Тетерин В. С., Мосяков М. А.

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
(г. Москва, Российская Федерация)
✉ sibirev2011@yandex.ru

Реферат. Закладка картофеля на хранение является критически важной и трудоемкой операцией, эффективность которой определяется конструкцией применяемых машин от качественного функционирования которых зависит минимизация повреждений клубней. Таким образом, актуальной проблемой является обоснование конструкции рабочих органов, способных минимизировать динамические нагрузки на продукцию и обеспечить равномерное распределение продукции. Целью исследования является определение закономерностей для обоснования функционирующих элементов автоматизированной машины для закладки картофеля на хранение. Проведение исследований выполнялось в условиях ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в 2024-2025 годы при использовании программ «SolidWorks», «Excel». Методы исследования базировались на комплексном теоретическом подходе, объединяющем математическую статистику, теорию случайных процессов для описания стохастического характера изменения плотности клубненосного вороха. Процесс транспортировки материала моделировался системой дифференциальных уравнений, преобразованных в операторную форму для анализа динамических свойств питателя как нелинейного звена с распределенной подачей. Проведен сравнительный анализ трех геометрических форм рабочей поверхности питателя на скорость подъема клубня: спирали Архимеда, логарифмической и гиперболической спиралей. Варьирование скоростей между типами исследуемых поверхностей в диапазоне углов $\pi/8$ – $3\pi/8$ находится в пределах 1–5%. Выявлено, что при увеличении угла поворота до $\pi/2$ только поверхность, выполненная по спирали Архимеда, обеспечивает линейный рост скорости подъема до максимального значения 1,6 м/с, в то время как логарифмическая и гиперболическая спирали дают прирост лишь до 1,0 м/с или снижение скорости. Полученные закономерности создают научно-техническую основу для проектирования автоматизированных машин для загрузки картофеля в хранилища, адаптированных для работы в условиях крестьянско-фермерских хозяйств с ограниченными площадями. Применение питателя, рабочая поверхность которого выполнена по спирали Архимеда, позволит повысить производительность за счет увеличения скорости подачи продукции, снизить ее травмирование и обеспечить более равномерное формирование насыпи.

Ключевые слова: хранение, автоматизация, картофель, теоретические исследования, обоснование параметров.

Для цитирования: Обоснование рабочих органов автоматизированной машины для закладки на хранение картофеля / А.С. Дорохов, А.В. Сибирёв, В.С. Тетерин, М.А. Мосяков // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 57-68. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-57-68

JUSTIFICATION OF THE OPERATING UNITS OF AUTOMATED MACHINE FOR STORED POTATOES

© 2026 Dorokhov A.S., Sibirev A.V. ✉, Teterin V.S., Mosyakov M.A.

Federal Scientific Agroengineering Center VIM
(Moscow, Russian Federation)
✉ sibirev2011@yandex.ru

Abstract. Potato storage is a critical and labor-intensive operation, the effectiveness of which is determined by the design of machines used, as their proper functioning minimizes damage to the tubers. Therefore, a pressing issue is the justification of operating units design capable of minimizing dynamic loads on the product and ensuring uniform distribution. The aim of this study is to identify patterns for justifying the operating elements of an automated machine for stored potatoes. The research was conducted at Federal Scientific Center for VIM in 2024-2025 using SolidWorks and Excel. Research methods were based on a comprehensive theoretical approach combining mathematical statistics and the theory of random processes to describe the stochastic nature of changes in tuber heap density. The material transport process was modeled using a system of differential equations transformed into operator form to analyze the dynamic properties of the feeder as a nonlinear element with distributed delivery. A comparative analysis of three geometric shapes of the feeder working surface for their effect on tuber lifting speed was conducted: an Archimedes spiral, a logarithmic spiral and a hyperbolic spiral. The speed

variation between studied surface types in the angle range of $\pi/8$ – $3\pi/8$ is within 1–5%. It was found that with an increase in the rotation angle to $\pi/2$, only the surface constructed according to Archimedes spiral ensures a linear increase in lifting speed to a maximum value of 1.6 m/s, while the logarithmic and hyperbolic spirals provide an increase of only up to 1.0 m/s or a decrease in speed. The obtained patterns provide a scientific and technical basis for the design of automated potato loading machines for storage facilities, adapted for use on small farms with limited space. Using a feeder with a working surface designed according to an Archimedes spiral will improve productivity by increasing the feed rate, reducing damage to the product and ensuring a more uniform mound formation.

Key words: storage, automation, potatoes, theoretical research, parameter justification.

For citation: Dorokhov AS, Sibirev AV, Teterin VS, Mosyakov MA. [Justification of the operating units of automated machine for stored potatoes]. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2026; Vol. 21. 1(81). 57–68 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-57-68

Введение. Технологический суверенитет Российской Федерации невозможно обеспечить без формирования условий качественно-го производства продукции растениеводства, что, в свою очередь, невозможно выполнить без надлежащей работы отечественной селекции при выведении новых сортов и гибридов семян [1, 2, 3]. Кроме того, обеспечение независимости продовольственной системы страны невозможно при высокой доле импорта машин и семенного материала, что ограничивает повышение объемов производства сельскохозяйственной продукции. Немаловажную роль играет технологическая модернизация, которая заключается в механизации и автоматизации наиболее трудоемких операций и постоянном повышении уровня технической оснащенности агропредприятий [4, 5, 6]. Одним из таких трудоемких и критически важных процессов, требующих механизации и повышения эффективности, является послеуборочное хранение полученного урожая картофеля [7, 8].

Наиболее важным этапом является операция закладки клубней в хранилище. Разнообразие различных типов погрузочных машин, ставит проблему выявления наиболее перспективных средств, способных эффективно работать в условиях крестьянско-фермерских хозяйств и небольших площадей хранилищ с использованием их полезной площади.

Для выполнения погрузочных операций при закладке продукции на хранение широкое распространение получили специализированные транспортеры-подборщики, такие как «Крот» производства ООО «Агротехмаш», ООО «Клиномаш», ООО «Колнаг и зарубежные аналоги от «Grimme», «Miedema». Данные машины оснащены телескопическими транспортерами, системой гасителей падения и гидравлическим приводом, направленными на снижение травмирования клубней и автоматизации процесса загрузки хранилищ. Однако, как показывает практика, всем указанным моделям присущи общие недостатки: недостаточная производительность при работе с засоренным ворохом, высокая материалоемкость и энергоемкость конструкции. Кроме того, погрузчики периодического действия не находят применения из-за высокой травмируемости продукции, что подтверждает необходимость совершенствования рабочих органов именно машин непрерывного действия.

При загрузке хранилища важно следить за перемещением стрелы погрузчика в горизонтальной плоскости [5, 9], во избежание образования в насыпи овощных культур почвенных столбов, из-за чего клубень начинает гнить или прорасти. Эффективным решением данной задачи является применение цифровых систем автоматического контроля и управления, в частности, технологий машинного зрения, позволяющих в реальном времени отслеживать границы насыпи и формировать ее террасным способом для оптимального использования площади хранилища [9, 10]. В свою очередь, эффективность работы таких интеллектуальных систем напрямую зависит от стабильности технологического процесса, которая во многом определяется конструкцией рабочих органов.

При автоматизированной закладке на хранение картофеля с использованием оборудования с активным питателем возникает сложная динамическая проблема. Функционирующие элементы электропривода, обеспечивающие плавную регулировку подачи, подвергаются резкопеременным случайным нагрузкам. Эти нагрузки носят характер случайных ударных воздействий, обусловленных самим процессом работы: внедрением рабочего органа питателя в неоднородную поверхность бурта картофеля [11, 12, 13]. Соппротивление бурта не постоянно, в результате чего питатель последовательно встречает области с разной плотностью, коэффициентами трения-скольжения, фрикционными свойствами, а также отдельные крупные клубни. Подобные явления приводят к тому, что циклические ударные нагрузки вызывают ускоренный механический износ функциональных элементов конструкции автоматизированной машины для закладки на хранение, таких как редукторы, подшипники и соединительные муфты, одновременно заставляя электропривод работать в режиме частых перегрузок. Это ведет к перегреву, снижению ресурса оборудования и риску аварийной остановки. Случайные ударные воздействия и связанные с ними вибрации, передаваясь на конструкцию машины, повышают травмирование клубней, создавая очаги для развития заболеваний и увеличивая потери картофеля при хранении. Классические системы управления оказываются неэффективными в таких условиях, поскольку рассчитаны на плавные изменения нагрузки. Они не могут быстро

компенсировать резкие удары, что и приводит к описанным проблемам с точностью работы, износом оборудования и травмированию клубней.

Следовательно, для повышения равномерности распределения клубней картофеля по объёму хранилища и снижения негативного влияния резкопеременных нагрузок, необходимо обеспечить разработку автоматизированной машины для закладки картофеля на хранение, функционирующие элементы которой, и в первую очередь рабочие органы питателя, спроектированы с учетом закономерностей взаимодействия с неоднородной средой. Такой подход позволит не только формировать требуемый контур насыпи, но и минимизировать динамические нагрузки, предотвращая ускоренный износ оборудования и травмирование продукции. В связи с этим целью исследования является определение закономерностей для обоснования функционирующих элементов автоматизированной машины для закладки картофеля на хранение.

Условия, материалы и методы. Проведение исследований выполнялось в условиях отдела «Технологии и машины для овощеводства» ФГБНУ ФНАЦ ВИМ при использовании программ «SolidWorks», «Excel» использование которых позволило обеспечить разработку конструктивных схем рабочих элементов автоматизированной машины для закладки на хранение картофеля, выполнить определение сил, действующих на клубень картофеля в процессе движения по поверхности подпорного питателя при варьировании параметров движения в зависимости от угла трения продукции о материал подпорного питателя и радиуса вектора, определяющего положение клубня картофеля на подпорном питателе. Объектом проведения исследований является автоматизированная машина для закладки на хранение картофеля и технологический процесс ее работы, с определением ее конструктивных, технологических и режимных параметров, характеризующих предмет исследований. При проведении исследований использовались методы системного анализа и синтеза, математической статистики, численные методы решения аналитических зависимостей для получения определения закономерностей для обоснования функционирующих элементов автоматизированной машины для закладки картофеля на хранение. Движение автоматизированной машины для закладки на хранение картофеля основано на теории динамики многих тел, а взаимодействие питателя загрузки с насыпным ворохом картофеля основано на теории динамики и теории дискретных элементов. Метод дискретных элементов часто используется для изучения взаимосвязи между почвой, сельскохозяйственными культурами и другими многочастичными средами и действующими компонентами. Частицы почвы представлены сферами радиусом 5 мм [14].

Данный метод позволяет наблюдать и анализировать смещение и напряжение частиц

после воздействия на них рабочих компонентов, а затем обеспечивать основу для оптимизации структуры и параметров рабочих компонентов.

Процесс исследования базировался на комплексном подходе, объединяющем теоретический и экспериментальный анализ. Ключевым объектом изучения выступила динамика взаимодействия рабочего органа с клубненосным ворохом, рассматриваемым как сыпучая среда со стохастически изменяющейся насыпной плотностью. Для описания ключевых технологических параметров использовался аппарат теории случайных процессов. Транспортировка вороха была смоделирована системой дифференциальных уравнений, преобразованных в операторную форму для получения передаточной функции и анализа динамических свойств системы как нелинейного звена. Для обоснования формы рабочей поверхности питателя использован метод Лагранжа, позволивший вывести дифференциальное уравнение движения клубня, моделируемого как материальная точка, с учётом всех активных сил и геометрии поверхности. На заключительном этапе производился сравнительный анализ трёх геометрических форм поверхности с использованием критерия оптимизации представленным максимальной скоростью подъёма клубня. Методика проведения теоретических исследований не предполагала наличие приборной базы для оценки показателей качества работы автоматизированной машины, оценки ее энергетических параметров.

Для создания эффективной цифровой системы управления автоматизированной машиной для закладки на хранение картофеля (рис. 1), необходимо смоделировать ключевой процесс распределения клубней. Основной задачей моделирования является определение влияния режимов работы питателя (сосредоточенного и распределенного) на формирование бурта. Полученные результаты в дальнейшем позволят разработать алгоритмы работы системы.

При выполнении моделирования подпорный питатель автоматизированной машины для закладки на хранение картофеля движется с поступательной скоростью движения для имитации процесса подачи клубней картофеля. Для моделирования сцепления между частицами почвы была выбрана модель Герца-Миндлина с противоскользкой моделью для моделирования контакта между частицами почвы [14] с фиксированным временным шагом операции моделирования при значении $7,5 \times 10^{-6}$ с.

В соответствии с известными характеристиками материала рабочей поверхности транспортерной ленты разрабатываемой автоматизированной машины и данными механических испытаний клубней картофеля установлены параметры материалов имитационной модели, значения которых представлены в таблице 1 [15, 16].

Таблица 1 – Физические параметры и контактные параметры имитационной модели рабочей поверхности выгрузного транспортера

Table 1 – Physical and contact parameters of the simulation model of the discharge conveyor's working surface

Параметр	Значение
Плотность клубней картофеля / (кг·м ³)	1090
Модуль упругости клубней картофеля / Па	6,6·10 ⁵
Коэффициент Пуассона клубней картофеля	0,37
Плотность силиконового каучука / (кг·м ³)	1400
Параметр C10 модели Муни-Ривлина для силиконовой резины, / Па	-423,8·10 ⁵
Параметр C01 модели Муни-Ривлина для силиконовой резины / Па	569,7·10 ⁵



Рис. 1 – Общий вид автоматизированной машины для закладки на хранение картофеля:

1 – подборщик автоматизированный; 2 – система транспортеров

Fig. 1 – General view of the automated machine for storing potatoes: 1 – automated pick-up device; 2 – conveyor system

Таблица 2 – Физические параметры и контактные параметры имитационной модели клубне-носного вороха (клубни картофеля и механические примеси)

Table 2 – Physical and contact parameters of the simulation model of the tuber-bearing heap (potato tubers and mechanical impurities)

Параметры	Грунт	Растительные примеси	Сталь
Плотность/(кг/м ³)	1850	243	7800
коэффициент Пуассона	0,38	0,4	0,31
Модуль сдвига/Па	1,0 × 10 ⁶	1,0 × 10 ⁶	7,0 × 10 ¹⁰
Коэффициент реституции (взаимодействие с клубнями)	0,2	0,5	0,28
Коэффициент статического трения (взаимодействие с грунтом)	0,4	0,3	0,5
Коэффициент трения качения (взаимодействие с клубнями)	0,25	0,05	0,04
Коэффициент реституции (взаимодействие с растительными примесями)	0,5	0,3	0,3
Коэффициент статического трения (взаимодействие с растительными примесями)	0,3	0,65	0,3
Коэффициент трения качения (взаимодействие с растительными примесями)	0,05	0,06	0,01
Коэффициент восстановления (взаимодействие со сталью)	0,28	0,3	-
Коэффициент статического трения (взаимодействие со сталью)	0,5	0,3	-
Коэффициент трения качения (взаимодействие со сталью)	0,04	0,01	-

В процессе моделирования использовались модели частиц почвы, картофеля и растительных остатков (ботва, корни) с физическими параметрами, представленными в таблице 2.

Для моделирования состояния насыпи клубненосного вороха с растительными примесями в хранилище с учетом реальных размеров были созданы три длинные линейные модели общей длиной 39 мм, расположенные по оси X, которые состояли из 25 шариков с радиус 1,5 мм и межцентровое расстояние 1,5 мм. Центральные оси трех длинных линейных моделей параллельны друг другу, а центральные оси расположены последовательно с интервалом 1,5 мм вдоль направления оси Y, то есть окончательного размера модели строу-частицы (X- ось × ось Y × ось Z)

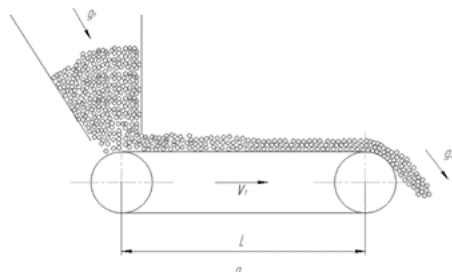
составляет 39 мм×6 мм×3 мм.

Изменение механического напряжения насыпной плотности $\rho_{нп}$ бурта картофеля, а также соответственно тягового сопротивления функционирующих элементов электропривода можно представить, как случайный процесс [14, 15, 16]. При этом, следует отметить, что переход насыпной плотности $\rho_{нп}$ из состояния $\rho_{1нп}$ в состояние $\rho_{2нп}$ (причем $\rho_{1нп} > \rho_{2нп}$) то для выполнения описания процесса закладки на хранение картофеля достаточно иметь информацию о одномерной плотности распределения вероятности $W_1(y_1, t_1)$ и двумерную условную плотность распределения вероятности перехода:

$$V_1(y_1, t_1 | y_{i-1}, t_{i-1}), \quad (1)$$

где i – значение текущего состояния процесса и времени.

Формирование требуемого контура загрузки хранилища картофеля определяется, в том числе способом подачи и равномерностью распределения клубней на транспортере загрузки.



Равномерность подачи клубненосного вороха при его сосредоточенной подаче в хранилище определяется функцией:

$$W_T = e^{-p\tau_T}, \quad (2)$$

где τ_T – время нахождения клубней картофеля на транспортере, с.

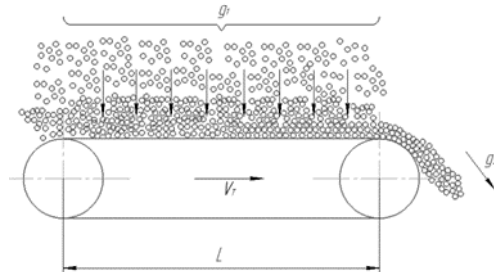


Рис. 2 – Равномерность распределения картофеля при закладке на хранение автоматизированной машиной: а – сосредоточенная подача; б – распределенная подача

Fig. 2 – Uniformity of potato distribution when stored using an automated machine: (a) concentrated feed; (b) distributed feed

Динамические свойства подпорного питателя 1 и выгрузного транспортера 2 (рис. 2) определяются функциональными зависимостями:

$$W_1 = e^{-p\tau_2}, W_2 = e^{-p\tau_3}, W_3 = e^{-p\tau_4}, \quad (3)$$

где τ_2 – время транспортирования клубненосного вороха по подпорному питателю автоматизированной машины, с;

τ_3 – время транспортирования клубненосного вороха от питателя до полотна автоматизированной машины, с;

τ_4 – время транспортирования клубненосного вороха от полотна до насыпной поверхности, с.

Примем допущение о том, что клубненосный ворох равномерно распределяется по всей поверхности транспортера при постоянной скорости переноса вороха $v_B = \text{const}$.

Удельная подача материала на единицу длины транспортера:

$$g = \frac{g_1}{L_T}, \quad (4)$$

где L_T – длина транспортера, м.

Предположим, что в результате стохастических процессов внешнего воздействия факторов, влияющих на качество закладки продукции в хранилище скачкообразно подача g_1 клубненосного вороха Δg .

Выше сказанное позволяет констатировать то, что перемещение клубненосного вороха на сходе с поверхности транспортера изменяется по линейной зависимости:

$$\partial g_2 = \Delta g / v_B dt \quad (5)$$

В то время как клубненосный ворох в течении времени τ_T достигнет схода:

$$\Delta g_2 = \Delta g v_B \int_0^{\tau_T} dt = \Delta g v_B \tau_T, \quad (6)$$

где τ_T – время транспортирования картофеля по транспортеру, с.

Скачкообразное изменение подачи показано на рисунке 3, в абсолютных величинах изменения расхода Δg_2 .

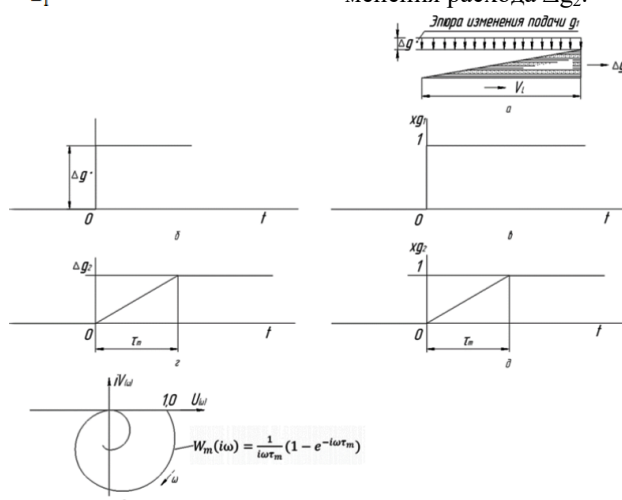


Рис. 3 – Динамика потоков вороха картофеля на транспортирующем устройстве с распределенной подачей материала

Fig. 3 – Dynamics of potato heap flows on a transporting device with distributed material feed

Исследуемый переходный процесс транспортирования клубненосного вороха автоматизированной машиной определяется системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{1}{v_B} \frac{\partial g_2}{\partial t} = \Delta g', \\ \Delta g_2 = \Delta g' v_B \tau_T. \end{cases} \quad (7)$$

Система уравнений (7) имеет решение

$$0 < t < \tau_T. \quad (8)$$

В операторной форме система уравнений (7) запишется в виде

$$X_{g_2} = \frac{1}{\tau_T p} (1 - e^{-p \tau_T}) X_{g_1} = W_T^p X_{g_1}. \quad (9)$$

Принимая во внимание выражение (9) имеем, что транспортер с распределенной подачей материала является динамически нелинейным звеном при абсолютно линейной статистической характеристике.

$$W_T^p = \frac{1}{p \tau_T} (1 - e^{-p \tau_T}). \quad (10)$$

Технологическая схема заборного элемента автоматизированной машины представлена на рисунке 4, представляющего собой подпорный элемент, обеспечивающий перемещение клубненосного вороха по своей поверхности и передачу на выгрузной транспортер автоматизированной машины (рис. 4).

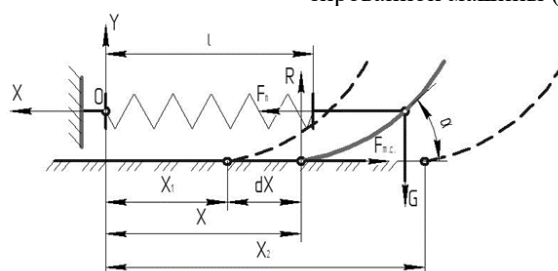


Рис. 4 – Схема к определению уравнения движения материальной точки по поверхности подпорного питателя

Fig. 4 – Diagram for determining the equation of motion of a material point on the surface of a retaining feeder

Необходимо уточнить, что в процессе перемещения забора клубней картофеля из бурта, лимитирующим параметром, определяющим качество подъема товарной продукции, является форма рабочей поверхности подпорного питателя [17].

Установлено, что в начальный момент

времени перемещение товарной поверхности по рабочей поверхности функционирующего элемента происходит по прямолинейной поверхности с соблюдением условия:

$$\gamma > \varphi, \quad (11)$$

где φ – угол трения почвы о материал подпорного питателя, град.

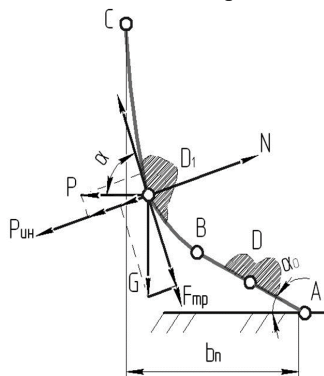


Рис. 5 – Силы, действующие на материальную точку по поверхности подпорного питателя
Fig. 5 – Forces acting on a material point on the surface of a retaining feeder

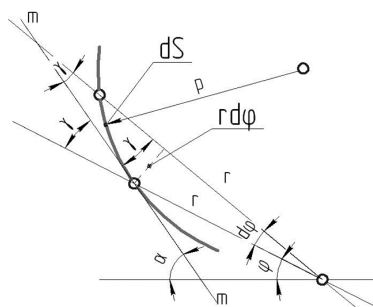


Рис. 6 – Схема для определения угла α
Fig. 6 – Diagram for determining angle α

Кроме того, повышение скорости подачи клубней картофеля на выгрузной транспортер автоматизированной машины для загрузки в хранилище зависит от формы поверхности рабочего органа для забора товарной продукции из бурта. Примем допущение и будем рассматривать клубень картофеля в виде материальной точки для определения уравнения ее движения [17]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i, \quad (12)$$

где i – число степеней свободы механической системы, $i = 1, 2, 3 \dots S$;

$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}$ – частные производные кинетической

энергии по обобщенным скоростям $\dot{q}_i$;

$\frac{\partial T}{\partial q_i}$ – частные производные кинетической энергии по обобщенным координатам q_i .

Для механической системы, обобщенная сила Q_i , соответствующая i -й обобщенной координаты равна [16]:

$$Q_i = \frac{\sum A_c}{\partial q_i}, \quad (13)$$

где $\sum A_c$ – сумма работ сил, действующих на материальную систему, Дж;

∂q_i – частная производная по обобщенной координате q_i .

Для определения обобщенной силы системы, вычислим сумму работ всех активных сил на возможных перемещениях точек системы.

В качестве обобщенной координаты выберем перемещение X подпорного питателя из начального X_1 в конечное X_2 положения.

К системе приложены активные силы: сила тяжести подпорного питателя – G , сила упругости насыпной поверхности корнеклубнеплодов – F_{Π} , нормальная реакция поверхности почвы – R .

В том случае, если не связи, наложенные на материальную систему являются идеальными, то к активным силам необходимо приложить еще силы реакции связи и силы трения, в нашем случае на систему действует сила трения скольжения почвы по поверхности подпорного питателя – $F_{T.C}$.

Искомая сумма работ сил имеет вид:

$$\sum A_c = A(G) + A(F_{\Pi}) + A(R) + A(F_{T.C}), \quad (14)$$

где $A(G)$ – работа силы тяжести, Дж; $A(F_{\Pi})$ – работа силы упругости пружины пружинно-упругого механизма, Дж; $A(R)$ – работы нормальной реакции поверхности почвы, Дж; $A(F_{T.C})$ – работа силы трения скольжения корнеклубнеплода по поверхности подпорного питателя, Дж.

Работа $A(G)$ силы тяжести G положительна, так как при движении подпорного питателя движется в направлении оси X :

$$A(G) = m_1 \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \delta X, \quad (15)$$

где m_1 – масса материальной точки, кг.

Рассмотрим силы, действующие на материальную частицу D , находящейся на поверхности подпорного питателя в произвольном положении. На корнеклубнеплод при подъеме из бурта действуют:

- G – вес корнеклубнеплода:

$$G = mg, \quad (16)$$

где m – масса корнеклубнеплода, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²;

P – сопротивление корнеклубнеплода подъему, Н; $P_{\text{ин}}$ – сила инерции, прижимающая корнеклубнеплод к поверхности подпорного питателя, Н;

N – нормальная реакция поверхности подпорного питателя, Н; $F_{\text{тр}}$ – сила трения корнеклубнеплода о поверхность подпорного питателя, Н.

Сила $P_{\text{ин}}$ инерции определяется:

$$P_{\text{ин}} = m \cdot \rho \cdot a_3^2 = \frac{m \cdot v^2}{\rho}. \quad (17)$$

Сила $F_{\text{тр}}$ трения корнеклубнеплода о рабочую поверхность подпорного питателя:

$$F_{\text{тр}} = f \cdot \left(G \cdot \cos \alpha + P \cdot \sin \alpha + \frac{m \cdot v^2}{\rho} \right). \quad (18)$$

Если кривую, описывающую форму подпорного питателя представить уравнением в полярных координатах $r = f(\varphi)$, то радиус кривизны поверхности рабочего органа:

$$\rho = \frac{[f^2(\varphi) + f'^2(\varphi)]^{3/2}}{[f^2(\varphi) + 2f^2(\varphi) - f(\varphi)f''(\varphi)]}. \quad (19)$$

Дифференциальное уравнение движения частицы корнеклубнеплода по поверхности рабочего органа имеет вид:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = P \cdot \cos \alpha - G \cdot \sin \alpha - f \cdot \left(G \cdot \cos \alpha + P \cdot \sin \alpha + \frac{m \cdot v^2}{\rho} \right), \quad (20)$$

Согласно рисунку 6 имеем, что:

$$\alpha = \varphi + \gamma. \quad (21)$$

Так как

$$\sin \gamma = \frac{rd\varphi}{ds}, \quad (22)$$

$$\cos \gamma = \frac{dr}{ds}, \quad (23)$$

Имеем:

$$\sin \alpha = \sin(\varphi + \gamma) = \sin \varphi \cdot \cos \gamma + \cos \varphi \cdot \sin \gamma = \frac{dr}{ds} \cdot \sin \varphi + \frac{rd\varphi}{ds} \cdot \cos \varphi, \quad (24)$$

$$\cos \alpha = \cos(\varphi + \gamma) = \cos \varphi \cdot \cos \gamma - \sin \varphi \cdot \sin \gamma = \frac{dr}{ds} \cdot \cos \varphi - \frac{rd\varphi}{ds} \cdot \sin \varphi. \quad (25)$$

Если пренебречь силой инерции $P_{\text{ин}}$:

$$P_{\text{ин}} = m \cdot \rho \cdot a_3^2 = \frac{m \cdot v^2}{\rho} = 0, \quad (26)$$

то уравнение (26) движения корнеклубнеплода по поверхности рабочего органа подпорного питателя запишется в виде:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = (P - f \cdot G) \cdot \cos \alpha - (G + f \cdot P) \cdot \sin \alpha. \quad (27)$$

Для решения уравнения (27) воспользуемся подстановкой:

$$A = (P - f \cdot G). \quad (28)$$

$$B = (G + f \cdot P). \quad (29)$$

С учетом выражений (28) и (29) выражение (30) примет вид:

$$m \cdot v \cdot dv = (A \cdot \cos \varphi - B \cdot \sin \varphi) \cdot dr - (A \cdot \sin \varphi - B \cdot \cos \varphi) \cdot r \cdot d\varphi. \quad (30)$$

Тогда

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = \int (A \cdot \cos \varphi - B \cdot \sin \varphi) \cdot a \cdot d\varphi - \int (A \cdot \sin \varphi + B \cdot \cos \varphi) \cdot a \cdot \varphi d\varphi. \quad (31)$$

Решая уравнение (31) при сравнении скорости движения клубня картофеля по рассматриваемым поверхностям заборного элемента определим рабочую поверхность, форма которой способствует повышению

скорости подъема, с учетом угла подъема формы поверхности:

$$a = \operatorname{ctg} \gamma_1 = \operatorname{ctg} 20^\circ = 2,74, \quad (32)$$

где γ_1 – угол между рабочей поверхностью подпорного питателя и касательной $m-m$ к рабочей поверхности, град.

Результаты и обсуждение. В результате выполненного моделирования процесса распределения клубней картофеля учитывающее динамические свойства транспортирующего устройства. Установлено, что коэффициент заполнения подпорного питателя машины для загрузки картофеля в хранилище является безразмерной величиной, равной отношению плотности фактически находящегося на рабочей поверхности биологических объектов с учетом пространства между клубнями к «идеальной» плотности сортированных клубней с размерами не менее 30-60 мм.

Таблица 3 – Результаты исследований по обоснованию конструкции рабочей поверхности подпорного питателя по наибольшей $v_{с.п.}$ скорости подъема клубня в зависимости от формы поверхности

Table 3 — Research results on justifying the design of the working surface of a retaining feeder based on the highest tuber lifting speed $v_{с.п.}$ depending on the surface shape

Скорость подъема клубня $v_{с.п.}$, м/с	Форма поверхности подпорного питателя			
	Спираль Архимеда			
	$r = a \cdot \varphi$			
	Угол поворота φ , град			
	$\frac{\pi}{8}$	$\frac{2\pi}{8}$	$\frac{3\pi}{8}$	$\frac{4\pi}{8}$
	0,61	0,63	0,65	1,57
Скорость подъема клубня $v_{с.п.}$, м/с	Логарифмическая спираль			
	$r = a \cdot e^\varphi$			
	Угол поворота φ , град			
	$\frac{\pi}{8}$	$\frac{2\pi}{8}$	$\frac{3\pi}{8}$	$\frac{4\pi}{8}$
	0,35	0,88	0,92	0,97
Скорость подъема клубня $v_{с.п.}$, м/с	Гиперболическая спираль			
	$r = a/\varphi$			
	Угол поворота φ , град			
	$\frac{\pi}{8}$	$\frac{2\pi}{8}$	$\frac{3\pi}{8}$	$\frac{4\pi}{8}$
	0,93	0,81	0,69	0,57

Данные, представленные в таблице 3 свидетельствуют о том, что поверхность, обладающей наибольшей скоростью подъема корнеклубнеплода является поверхность, выполненная по спирали Архимеда.

Анализ полученных результатов исследований, представленный в таблице 2 отображен в форме графической зависимости рисунка 7, свидетельствующий о перспективности проведения работ в направлении совершенствования функционирующего элемента автоматизированной машины, выполненной по форме спирали Архимеда, как рабочего органа с наибольшей скоростью подъема клубней картофеля.

Ось абсцисс представленного графика отображает изменения формы поверхности рабочего элемента – угол поворота образующей формы поверхности, по оси ординат указан исследуемый технологический параметр – скорость подъема клубня картофеля.

Анализ графической зависимости, представленной на рисунке 7 свидетельствует о том, что при увеличении угла поворота поверхности подпорного питателя в интервале до происходит повышение скорости подъема частиц от 0,4 до 1,0 м/с всех типов исследуемых поверхностей, в среднем до 1-5% при варьировании типа рабочего органа.

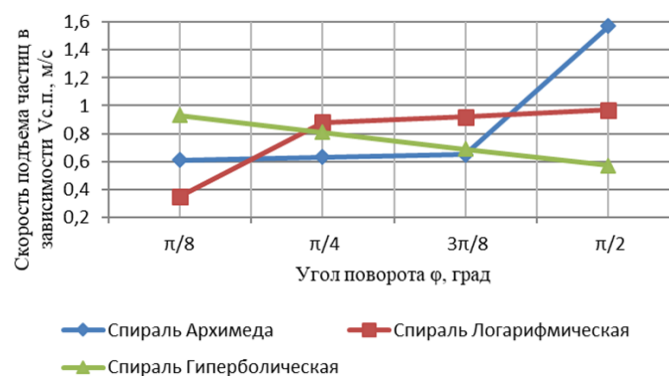


Рис. 7 – Зависимость скорости подъема клубня картофеля от формы поверхности подпорного питателя $V_{с.п.}$

Fig. 7 — Dependence of the potato tuber lifting speed on the shape of the retaining feeder's surface ($V_{с.п.}$)

Однако, дальнейшее увеличение угла поворота рабочей поверхности до приводит к увеличению скорости подъема корнеклубнеплода до значения 1,6 м/с только лишь у рабочей поверхности питателя, выполненной по спирали Архимеда. Данное обстоятельство характеризуется особенностью элементов конструкции подпорного питателя, обусловленная равномерным увеличением радиуса при вращении точки вокруг центра поверхности питателя.

Линейное повышение скорости подъема корнеклубнеплода до значения 1,0 м/с в диапазоне углов $\pi/8$ - $\pi/2$, у рабочей поверхности питателя, выполненной по логарифмической спирали объясняется формированием траектории движения корнеклубнеплода со скоростью, пропорционально пройденному расстоянию равномерно вращающейся по прямой, согласно свойству данной поверхности. Движение корнеклубнеплода по рабочей поверхности подпорного питателя, выполненной по гиперболической спирали в интервале исследуемых углов поворота от до выполняется по линейной затухающей траектории со снижением скорости от 0,9 до 0,5 м/с, что следует интерпретировать обстоятельством, обусловленным формированием данной рабочей поверхности обратно пропорционально увеличению радиуса при вращении точки вокруг центра поверхности питателя. Варьирование скоростей между типами исследуемых поверхностей подпорного питателя находится в интервале значений 1-5% в диапазоне углов $\pi/8$ - $3\pi/8$ следует объяснить наличием равных начальных скоростей движения клубня и их увеличением при $\pi/2$ до значений 0,6 м/с, 1,0 м/с и 1,6 м/с в зависимости от типа рабочей поверхности в виду особенностей формы рабочей поверхности. Статистические характеристики результатов исследований ограничивались определением стандартной ошибки 1,16, и дисперсии ошибки 1,36.

Анализ предшествующих научных исследований данной тематической области [14, 18, 19], а также существующих конструкций машин для загрузки сельскохозяйственных культур

свидетельствует о том, что предлагаемая конструкция подпорного питателя разрабатываемой автоматизированной машины обеспечивает наибольшую скорость подъема клубня картофеля по подпорному питателю, равную 1,6 м/с при значении угла поворота $\pi/2$, форма рабочей поверхности которого выполнена по спирали Архимеда.

Таким образом, полученные результаты исследований позволяют констатировать целесообразность разработки, изготовления и проведения дальнейших экспериментальных исследований подпорного питателя автоматизированной машины для закладки на хранение картофеля рабочая поверхность которого выполнена по спирали Архимеда, что обеспечивает наибольшую скорость подъема клубня картофеля и передачи товарной продукции на дальнейшие устройства сепарации, что способствует повышению производительности выполнения технологической операции загрузки картофеля в хранилище.

Выводы. Определены закономерности для обоснования функционирующих элементов (подпорного питателя и транспортирующего устройства с распределенной/равномерной подачей материала) автоматизированной машины для закладки картофеля на хранение. Рассмотрены способы подачи картофеля при технологическом процессе работы автоматизированной машины для закладки на хранение при сосредоточенной и распределенной подаче. Установлена динамика потоков схода клубневого вороха на транспортирующем устройстве с распределенной подачей материала при технологическом процессе работы автоматизированной машины для загрузки картофеля. Определены теоретические зависимости скорости подъема клубней картофеля от формы поверхности подпорного питателя (спираль Архимеда, логарифмическая и гиперболическая спирали) при варьировании параметров движения корнеклубнеплода по поверхности рабочего органа от угла трения продукции и радиуса вектора, определяющего положение корнеклубнеплода на подпорном питателе. Варьирование скоростей между

типами исследуемых поверхностей подпорного питателя находится в интервале значений 1-5% в диапазоне углов $\pi/8$ - $3\pi/8$ и объясняется наличием равных начальных скоростей движения клубня с их увеличением до значений 0,6 м/с, 1,0 м/с и 1,6 м/с при угле подъема до $\pi/2$ в зависимости от типа рабочей поверхности в виду особенностей их конструктивного исполнения. Установлено, что увеличение угла поворота рабочей поверхности до приводит к повышению скорости подъема корнеклубнеплода до значения 1,6 м/с только лишь у рабочей поверхности питателя, выполненной по спирали Архимеда, что определяет целесообразность проведения дальнейших экспериментальных исследований данного подпорного питателя, обеспечивающего наибольшую скорость подъема клубня картофеля и передачу товарной продукции на дальнейшие устройства сепарации, что

способствует повышению производительности выполнения технологической операции загрузки картофеля в хранилище.

Использование автоматизированной машины для загрузки картофеля на хранение способствует повышению равномерности распределения продукции в хранилище, а также снижение прямых затрат труда, себестоимости продукции за счет повышения производительности, в том числе за счет увеличения скорости подъема клубня картофеля по поверхности подпорного питателя. Полученные результаты исследований создают научно-техническую основу для создания отечественного импортозамещающего автоматизированного комплекса для загрузки картофеля в хранилище, ориентированного на устойчивое, ресурсосберегающее и высокопродуктивное сельскохозяйственное производство.

Литература

1. Овэс Е. В., Гаитова Н. А., Шишкина О. А. Индуцирование микроклубнеобразования новых перспективных сортов картофеля в асептической культуре // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2020. Т.15. № 4(60):48-54. doi: 10.12737/2073-0462-2021-48-54
2. Картофель: российский опыт возделывания // Наше сельское хозяйство. 2020. № 11(235). С. 86-90.
3. Гаврилова А. Ю., Конова А. М., Чехалкова Л. К. Влияние применения возрастающих доз минеральных удобрений на урожайность и качество клубней картофеля нового сорта «Смоляночка» // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 2(66). С. 62-69. doi: 10.18286/1816-4501-2024-2-62-69.
4. Научно-технические достижения агроинженерной науки в условиях цифровизации сельского хозяйства / Я.П. Лобачевский, Ю.Ф. Лачуга, А.Ю. Измайлов, Ю.Х. Шогенов // Российская сельскохозяйственная наука. 2025. №. 3. С. 45-53.
5. Xiong, Y., Ge Y., Grimstad L., et al. An autonomous strawberry-harvesting robot: Design, development, integration, and field evaluation. // J. Field Robot. 2020, 37, 202–224. doi:10.1002/rob.21889
6. Создание устойчивой среды при выращивании картофеля / О.А. Старовойтова, В.И. Старовойтов, А.А. Манохина, В.А. Чайка // Агроинженерия. 2020. № 5(99). С. 15-20. doi: 10.26897/2687-1149-2020-5-15-20.
7. Контейнерно-транспортная технология уборки, хранения и реализации селекционного картофеля первой полевой репродукции / А.С. Дорохов, А.В. Сибирев, М.А. Мосяков и др. // Вестник РСХН. 2024. № 1. С. 72–76. doi: 10.31857/S2500208224010168
8. Актуальные проблемы и приоритетные направления развития картофелеводства / А.В. Коршунов, Е.А. Симаков, Ю.Н. Лысенко и др. // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 3. С. 12-20. doi: 10.24411/0235-2451-2018-10303.
9. Оценка эффективности технологического процесса машинно-тракторного агрегата для уборки овощных культур и картофеля / А.С. Дорохов, А.Г. Аксенов, А.В. Сибирев и др. // Аграрный научный журнал. 2023. № 2. С. 112-116. doi: 10.28983/asj.y2022i2pp112-116.
10. Golmohammadi A., Bejaei F., Behfar H. Design, Development and Evaluation of an Online Potato Sorting System Using Machine Vision // International Journal of Agriculture and Crop Sciences. 2013. Vol. 6. P. 396–402.
11. Физико-механические параметры почвы при выращивании картофеля на грядах / О.А. Старовойтова, В.И. Старовойтов, А.А. Манохина, С.М. Духанина // Земледелие. 2018. № 5. С. 16-20. doi: 10.24411/0044-3913-2018-10504.
12. Совершенствование технологической системы для фитосанитарных работ в биологизированном производстве семян картофеля / А.Б. Калинин, В.А. Смелик, И.З. Теплинский и др. // Техника и оборудование для села. 2025. № 12(342). С. 2-6. doi: 10.33267/2072-9642-2025-12-2-6.
13. Колчин Н.Н., Пономарев А.Г., Зернов В.Н. Новая техника для картофелеводства // Картофель и овощи. 2019. № 6. С. 26 – 29. doi: 10.25630/PAV.2019.77.31.006
14. Suprem A., Mahalik N., Kim K. A review on application of technology systems, standards and interfaces for agriculture and food sector // Comput. Stand. Interfaces. 2013. 35. Pp. 355–364.
15. Zu L. et al. Design and experiment of nondestructive post-harvest device for tomatoes // Agriculture. 2022. T. 12. №. 8. С. 1233.
16. Показатели качества работы автоматизированной машины для ухода за растениями картофеля в селекции и семеноводстве / Н.В. Сазонов, М.А. Мосяков, В.С. Тетерин и др. // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2024. Т. 18. № 1. С. 60-67. doi: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-60-67.
17. Lü J.Q., Sun H., Dui H., et al. Design and experiment on conveyor separation device of potato digger under heavy soil condition // Transactions of the CSAM. 2017. Issue number 48(11). P. 146 – 155. doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.018a
18. Лобачевский Я. П. Научное обеспечение приоритетных технологий агропромышленного комплекса Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2024. Т. 94. № 3. С. 275-282. doi: 10.31857/S0869587324030102.

19. Дорохов А. С., Аксенов А. Г., Сибирев А. В. Лабораторные исследования макетного образца микроклиматической камеры для хранения мини-клубней картофеля в селекционно-семеноводческом процессе // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 1(61). С. 183-189. doi: 10.18286/1816-4501-2023-1-183-189.

References

1. Oves EV, Gaitova NA, Shishkina OA. [Induction of microtuber formation of new promising potato varieties in aseptic culture]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020; Vol.15. 4(60). 48-54 p. doi: 10.12737/2073-0462-2021-48-54
2. [Potatoes: Russian cultivation experience]. Nashe selskoe khozyaystvo. 2020; 11(235). 86-90 p.
3. Gavrilova Ayu, Konova AM, Chekhalkova LK. [The influence of increasing doses of mineral fertilizers on yield and quality of potato tubers of the new variety Smolyanochka]. Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2024; 2(66). 62-69 p. doi: 10.18286/1816-4501-2024-2-62-69.
4. Lobachevskiy YaP, Lachuga YuF, Izmaylov AYU, Shogenov YuKh. [Scientific and technical achievements of agroengineering science in the context of digitalization of agriculture]. Rossiyskaya selskokhozyaystvennaya nauka. 2025; 3. 45-53 p.
5. Xiong Y, Ge Y, Grimstad L. An autonomous strawberry-harvesting robot: Design, development, integration and field evaluation. J. Field Robot. 2020; 37. 202-224 p. doi:10.1002/rob.21889
6. Starovoytova OA, Starovoytov VI, Manokhina AA, Chayka VA. [Creating a sustainable environment for growing potatoes]. Agrozhenneriya. 2020; 5(99). 15-20 p. doi: 10.26897/2687-1149-2020-5-15-20.
7. Dorokhov AS, Sibirev AV, Mosyakov MA. [Container-transport technology for harvesting, storing and selling breeding potatoes of the first field reproduction]. Vestnik RSKhN. 2024; 1. 72-76 p. doi: 10.31857/S2500208224010168
8. Korshunov AV, Simakov EA, Lysenko YuN. [Actual problems and priority areas for the development of potato growing]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2018; Vol.32. 3. 12-20 p. doi: 10.24411/0235-2451-2018-10303.
9. Dorokhov AS, Aksenov AG, Sibirev AV. [Evaluation of the efficiency of technological process of a machine-tractor unit for harvesting vegetable crops and potatoes]. Agrarnyy nauchnyy zhurnal. 2023; 2. 112-116 p. doi: 10.28983/asj.y2022i2pp112-116.
10. Golmohammadi A, Bejaei F, Behfar H. Design, development and evaluation of an online potato sorting system using machine vision. International Journal of Agriculture and Crop Sciences. 2013; Vol.6. 396-402 p.
11. Starovoytova OA, Starovoytov VI, Manokhina AA, Dukhanina SM. [Physico-mechanical parameters of the soil when growing potatoes on ridges]. Zemledelie. 2018; 5. 16-20 p. doi: 10.24411/0044-3913-2018-10504.
12. Kalinin AB, Smelik VA, Teplinskiy IZ. [Improvement of the technological system for phytosanitary work in the biologized production of potato seeds]. Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2025; 12(342). 2-6 p. doi: 10.33267/2072-9642-2025-12-2-6.
13. Kolchin NN, Ponomarev AG, Zernov VN. [New equipment for potato growing]. Kartofel i ovoshchi. 2019; 6. 26-29 p. doi: 10.25630/PAV.2019.77.31.006
14. Suprem A, Mahalik N, Kim K. A review on application of technology systems, standards and interfaces for agriculture and food sector. Comput. Stand. Interfaces. 2013; 35. 355-364 p.
15. Zu L. Design and experiment of nondestructive post-harvest device for tomatoes. Agriculture. 2022; Vol.12. 8. 1233 p.
16. Sazonov NV, Mosyakov MA, Teterin VS. [Performance indicators of an automated machine for potato plant care in breeding and seed production]. Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii. 2024; Vol.18. 1. 60-67 p. doi: 10.22314/2073-7599-2024-18-1-60-67.
17. Lu JQ, Sun H, Dui H. Design and experiment on conveyor separation device of potato digger under heavy soil condition. Transactions of the CSAM. 2017; Issue number 48(11). 146-155 p. doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.018a
18. Lobachevskiy YaP. [Scientific support for priority technologies of the agro-industrial complex of the Russian Federation]. Vestnik Rossiyskoy akademii nauk. 2024; Vol.94. 3. 275-282 p. doi: 10.31857/S0869587324030102.
19. Dorokhov AS, Aksenov AG, Sibirev AV. [Laboratory studies of the model sample of microclimate chamber for storage of potato minitubers in seed selection process]. Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2023; 1(61). 183-189 p. doi: 10.18286/1816-4501-2023-1-183-189.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Дорохов Алексей Семенович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, академик РАН, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5), e-mail: dorokhov@rgau-msha.ru, ORCID 0000-0002-4758-3843

Сибирев Алексей Викторович – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5), e-mail: sibirev2011@yandex.ru, ORCID 0000-0002-9442-2276

Тетерин Владимир Сергеевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5), e-mail: v.s.teterin@mail.ru, ORCID 0000-0001-8116-723X

Мосяков Максим Александрович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5), e-mail: maks.mosyakov@yandex.ru, ORCID 0000-0002-5151-7312

Вклад авторов:

А.С. Дорохов – формулирование основной концепции исследования;
В.С. Тетерин – разработка методологии исследования;
А.В. Сибирёв – описание результатов и формирование выводов исследования, подготовка начального варианта текста;
М.А. Мосяков – представление результатов, подготовка графических материалов.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 24.08.2025; одобрена после рецензирования 23.03.2026; принята к публикации 01.04.2026.

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

Authors:

Dorokhov Alexey Semenovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Academician of the Russian Academy of Sciences (RAS), Federal Scientific Agroengineering Center VIM (1st Institutskiy Proyezd, Building 5, Moscow, 109428, Russian Federation), e-mail: dorokhov@rgau-msha.ru, ORCID 0000-0002-4758-3843

Sibirev Alexey Viktorovich – Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Chief Researcher at the Department of Technologies and Machines in Vegetable Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (1st Institutskiy Proyezd, Building 5, Moscow, 109428, Russian Federation), e-mail: sibirev2011@yandex.ru, ORCID 0000-0002-9442-2276

Teterin Vladimir Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher at the Department of Technologies and Machines in Vegetable Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (1st Institutskiy Proyezd, Building 5, Moscow, 109428, Russian Federation), e-mail: v.s.teterin@mail.ru, ORCID 0000-0001-8116-723X

Mosyakov Maxim Alexandrovich – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher at the Department of Technologies and Machines in Vegetable Production, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (1st Institutskiy Proyezd, Building 5, Moscow, 109428, Russian Federation), e-mail: maks.mosyakov@yandex.ru, ORCID 0000-0002-5151-7312

Contribution of the authors:

A.S. Dorokhov – Conceptualization;
V.S. Teterin – Research methodology;
A.V. Sibirev – Description of the results (data curation) and presentation of conclusions, Writing – original draft preparation;
M.A. Mosyakov – Presentation of results, Visualization.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 24.08.2025; revised 23.03.2026; accepted 01.04.2026.

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УРОЖАЙНОСТИ ЗЕМЛЯНИКИ САДОВОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЛА И АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

© 2026 Кутырёв А. И. ✉, Филиппов Р. А.

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ
(г. Москва, Российская Федерация)
✉ alexeykutyrev@gmail.com

Реферат. В статье представлен метод дистанционного мониторинга и прогнозирования урожайности земляники садовой (*Fragaria × ananassa*), основанный на применении беспилотных летательных аппаратов (БЛА), технологий компьютерного зрения и глубокого обучения. Использование морфологических особенностей культуры, обеспечивает высокую точность детекции с БЛА. Исследование проводилось с использованием сверточной нейронной сети YOLO12 версия Extra Large, обученной методом трансферного обучения (Transfer Learning) на специализированном датасете изображений цветков земляники садовой (класс "Flower"). Датасет создан путем ручной разметки в программе RectLabel и расширен до 1700 изображений (18496 экземпляров) с помощью комплексной аугментации данных. Сбор исходных данных осуществлялся с помощью БЛА DJI Mavic 3M (RGB-камера) на высоте 30-60 м. Обработка снимков включала построение высокоточного ортофотоплана (разрешение 0,570 мм/пиксель) в программе Agisoft Metashape Pro. Для детекции ортофотоплан автоматически разбивался на фрагменты 200×200 пикселей. Обучение модели YOLO12 (гиперпараметры: batch size=8, learning rate=0.001, эпохи=1500) достигло высоких метрик на тестовой выборке: точность (Precision) 0,903, полнота (Recall) 0,812, F-мера 0,852, mAP50 0,888. На основе разработанного метода создано специализированное программное обеспечение с графическим интерфейсом, реализующее полный цикл обработки: разбиение ортофотоплана на плитки, детекцию цветков, объединение результатов детекции в единый ортофотоплан, пространственный анализ (построение тепловых карт плотности, расчет индекса Морана для оценки кластеризации, кластерный анализ K-means, визуализация диаграмм Вороного) и прогнозирование урожайности по формуле, учитывающей количество распознанных цветков, сортовые коэффициенты преобразования и средний вес ягоды. Применение метода позволяет автоматизировать подсчет цветков на больших площадях, выявлять зоны неоднородной продуктивности, прогнозировать урожайность на ранних стадиях вегетации, существенно сокращая трудозатраты и обеспечивая основу для принятия агротехнических решений.

Ключевые слова: сверточные нейронные сети, трансферное обучение, обработка изображений, мониторинг, прогнозирование урожайности, точное земледелие.

Для цитирования: Кутырёв А.И., Филиппов Р.А. Разработка автоматизированного метода прогнозирования урожайности земляники садовой с использованием БЛА и алгоритмов машинного обучения // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 69-78. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-69-78

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED METHOD FOR FORECASTING STRAWBERRY YIELD USING UAVS AND MACHINE LEARNING ALGORITHMS

© 2026 Kutyrev A. I. ✉, Filippov R. A.

Federal Scientific Agroengineering Center VIM
(Moscow, Russian Federation)
✉ alexeykutyrev@gmail.com

Abstract. This article presents a method for remote monitoring and forecasting of strawberry (*Fragaria × ananassa*) yields based on unmanned aerial vehicles (UAVs), computer vision and deep learning technologies. Using morphological features of the crop, UAVs ensure high detection accuracy. The study was conducted using YOLO12 Extra Large convolutional neural network, trained using transfer learning on a specialized dataset of strawberry flower images (class "Flower"). The dataset was created by manual labeling in RectLabel and expanded to 1700 images (18 496 exemplars) using complex data augmentation. Initial data were collected using a DJI Mavic 3M UAV (RGB camera) at an altitude of 30-60 m. Image processing included the construction of a high-precision orthomosaic (resolution 0.570 mm/pixel) in Agisoft Metashape Pro. Orthomosaic was automatically divided into 200×200 pixel fragments for detection. Training YOLO12 model (hyperparameters: batch size = 8, learning rate = 0.001, epochs = 1500) achieved high metrics on the test set: precision 0.903, recall 0.812, F-measure 0.852, mAP50 0.888. Based on the developed method, specialized software with a graphical interface was created. It implements the full processing cycle: orthomosaic tiling, flower detection, merging detection results into a single orthomosaic, spatial analysis (construction of density heat maps,

calculation of Moran's index for clustering assessment, K-means cluster analysis, visualization of Voronoy diagrams), and yield forecasting using a formula that takes into account the number of recognized flowers, varietal conversion factors and average berry weight. The method enables automated flower counting over large areas, identification of zones of uneven productivity and yield forecasting in the early stages of vegetation, significantly reducing labor costs and providing a basis for making agricultural decisions.

Key words: convolutional neural networks, transfer learning, image processing, monitoring, yield forecasting, precision farming.

For citation: Kuttyrev AI, Filippov RA. [Development of an automated method for forecasting strawberry yield using UAVs and machine learning algorithms]. Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2026; Vol. 21. 1(81). 69-78 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-69-78

Введение. Земляника садовая (*Fragaria × ananassa*) занимает лидирующие позиции в мировом ягодном производстве благодаря высокой урожайности, отличным вкусовым качествам и относительной неприхотливости при возделывании [1]. Эффективное планирование агротехнических процессов и прогнозирование объемов сбора земляники садовой невозможно без регулярного наблюдения за состоянием растений и анализа их продуктивности [2]. Однако традиционные методы оценки урожайности, основанные на визуальном осмотре, требуют значительных трудозатрат и не всегда обеспечивают высокую точность. Эти методы предполагают регулярные обходы плантаций агрономами, которые визуально оценивают количество цветоносов, завязей и плодов, что является субъективным и время затратным процессом [3, 4, 5].

Морфологические особенности земляники садовой в отличие от клубники (*Fragaria vesca*), характеризуются низким габитусом, открытой структурой куста и визуально выделяющимися плодами [6, 7]. При этом цветки земляники садовой характеризуются более крупными размерами (диаметром 15-25 мм) и расположены на удлиненных цветоносах, возвышающихся на 5-15 см над листовой розеткой. Белые лепестки цветков создают выраженный цветовой контраст с зеленой листвой (значения NDVI 0,15-0,25 для цветков против 0,7-0,8 для листьев), а их пространственное распределение с интервалом 8-12 см способствует высокой точности распознавания при разрешении 0,5 см/пиксель с минимальным количеством ложноположительных срабатываний (<5%), сохраняя стабильность идентификации при углах съёмки до 30°, что позволяет применять методы дистанционного мониторинга на базе беспилотных летательных аппаратов (БЛА) [8, 9].

Применение беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и алгоритмами компьютерного зрения, позволяют автоматизировать этот процесс, обеспечивая объективность и повторяемость результатов [10, 11]. Внедрение инновационных систем мониторинга, основанных на методах машинного обучения и обработки изображений, позволяет оптимизировать выращивание культуры, сократить потери урожая, повысить товарные характеристики ягод и обеспечить более рациональное использование ресурсов [12, 13, 14].

В современных зарубежных исследованиях

активно развиваются методы прогнозирования урожайности земляники садовой на основе дистанционного мониторинга и глубокого обучения [15]. В исследовании [9] предложили систему прогнозирования урожая земляники с использованием БЛА для получения детализированных ортофотопланов и сверточной нейронной сети Faster R-CNN для детекции цветков и плодов. Авторы достигли точности подсчета цветков 84,1% при среднем уровне взаимного перекрытия объектов распознавания 13,5%, показали возможность построения пространственных карт распределения цветков и плодов для мониторинга развития растений. В исследованиях [6] представлена гибридная легковесная сеть VM-YOLO, интегрирующая модель пространства состояний (VMamba). Предложенная модификация позволила достичь метрики mAP 71,4% при значительно сниженном количестве параметров (30 млн) по сравнению с базовыми моделями, что делает систему применимой для развертывания на мобильных платформах с ограниченными вычислительными ресурсами. Альтернативный подход к прогнозированию урожайности предложен в исследованиях [16], в которых вместо детекции цветков сосредоточились на распознавании цветоложа. Сочетание Faster R-CNN для детекции цветоложа с байесовским моделированием позволило создать статистически обоснованную модель прогноза урожайности.

В статье предлагается метод дистанционного мониторинга земляники с использованием БЛА DJI Mavic 3M и нейронной сети YOLO12. Сверточная нейронная сеть YOLO12, как усовершенствованная версия модели YOLO, показывает высокую скорость и точность обработки изображений в сложных условиях. Эта архитектура модели оптимизирована для задач распознавания объектов небольшого размера на сложном фоне [17, 18]. Разработанный метод позволит оптимизировать планирование урожая, сократить затраты на ручной труд и повысить эффективность производства за счет более точного прогнозирования сроков созревания и объемов урожая. Сочетание БЛА и современных методов глубокого обучения открывает перспективы для точного и автоматизированного прогнозирования урожайности земляники садовой [19]. Развитие этого направления предполагает интеграцию полученных данных с системами управления агропредприятиями,

позволит принимать более обоснованные управленческие решения на всех этапах производства ягодной продукции.

Цель исследования – разработка метода сбора и обработки данных для определения потенциальной урожайности земляники садовой на основе подсчёта цветков на изображениях с использованием БЛА, свёрточной нейронной сети YOLO12 и трансферного обучения (Transfer Learning).

Условия, материалы и методы. Разработан комплексный метод автоматического подсчёта цветков земляники садовой на высокодетализированных аэрофотоснимках, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов. Метод позволяет оценивать потенциальную урожайность на основе данных о количестве распознанных цветков. Процесс включает несколько этапов: создание ортофотоплана насаждений, разбиение ортофотоплана на отдельные фрагменты (изображения), детекцию цветков с использованием модели свёрточной нейронной сети на фрагментах и последующее объединение результатов для итогового подсчёта.

Сбор исходного набора данных (изображений), съёмка рядов садовых земляники садовой проводилась с использованием БЛА DJI Mavic 3 Multispectral (Mavic 3M), оснащённого RGB-камерой с матрицей CMOS (4/3", 20 Мп), фокусным расстоянием 24 мм и углом обзора 84°. Полеты выполнялись в ЗАО «Совхоз имени Ленина» в 2024 году, на высоте 30-60 метров в дневное время при ясной погоде. Маршрут полета квадрокоптера включал в себя движение над рядками земляники садовой сорта Зенга-Зенгана челночным способом. Освещение во время съёмки составляло от 60000 лк до 110000 лк. Участок

площадью 0,5 га характеризовался ровным рельефом. Агротехника возделывания соответствовала интенсивной технологии, однострочная схема посадки (ширина междурядий 0,9 м, расстояние между растениями в ряду 0,25 м) на мульчирующей пленке. Фенофаза растений на момент съёмки – массовое цветение.

Обработка исходных аэрофотоснимков для формирования высокоточного ортофотоплана выполнялась ПО Agisoft Metashape Pro версии 2.2.1. После импорта RGB-изображений высокого разрешения выполнено выравнивание снимков (Align Photos) с использованием алгоритма Structure-from-Motion (SfM), что позволяет восстановить позиции и ориентации камер с формированием разреженного облака точек. На следующем этапе было построено плотное облако точек (Build Dense Cloud) в режиме «Среднее качество» с применением «Мягкой фильтрации» для устранения выбросов. Затем на основе плотного облака была сгенерирована цифровая модель поверхности (DEM) (Build Mesh) с качеством «Среднее» и включенной опцией «Заполнение отверстий», что позволило построить полигональную модель (рис. 1). Для текстурирования модели была создана тайловая модель текстуры (Build Texture) с 7 уровнями детализации (0,570 мм/пиксель). Ортофотоплан (Build Orthomosaic) был экспортирован в режиме «Мозаика» на основе построенной поверхности, с разрешением 0,570 мм/пиксель, размером 8817×6301 пикселей, в цветовом пространстве RGB (3 канала, uint8), что обеспечило геометрически корректное, бесшовное и детализированное представление насаждений земляники, необходимое для последующего автоматизированного анализа.

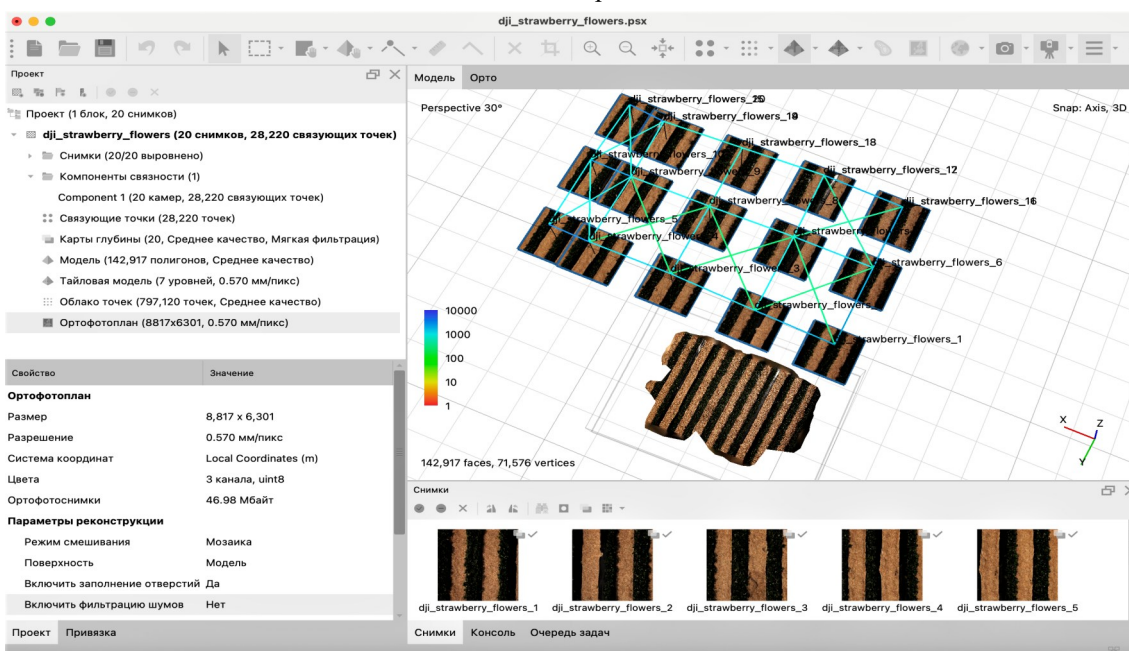


Рис. 1 – Создание ортофотоплана в программе Agisoft Metashape Pro 2.2.1, цифровая модель поверхности

Fig. 1 – Orthophoto generation in Agisoft Metashape Pro 2.2.1, digital surface model

Для оптимизации вычислительных ресурсов исходный ортофотоплан разделяется на фрагменты размером 200×200 пикселей с помощью разработанного программного обеспечения на Python с использованием библиотек PyQt5, OpenCV и Pillow. Каждый фрагмент сохраняется с уникальным именем, содержащим информацию о его положении на исходном изображении,

что упрощает последующую обработку данных.

Подготовка датасета изображений осуществлялась в программе RectLabel путем ручной разметки объектов класса «Flower» (цветки земляники садовой) на 34 исходных RGB-изображениях (ортофотоплан) высокого разрешения (8192×5460 пикселей), полученных с БЛА (рис. 2).

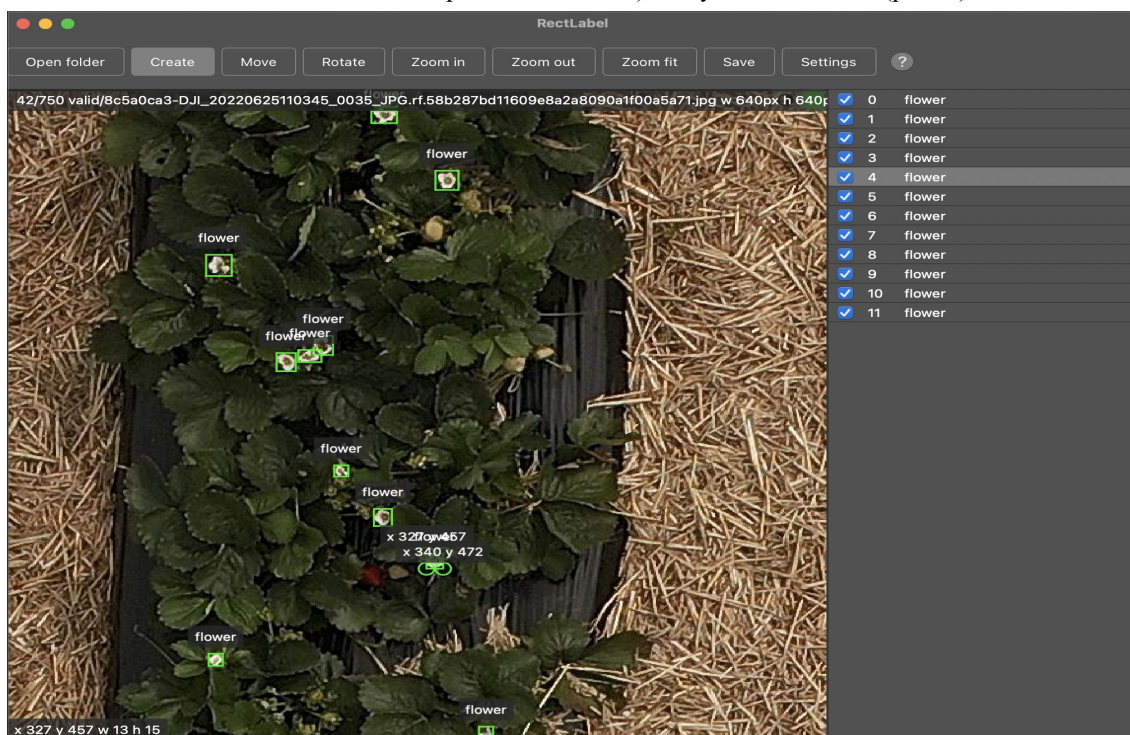


Рис. 2 – Разметка цветков земляники садовой с использованием инструмента RectLabel

Fig. 2 – Annotation of garden strawberry flowers using the RectLabel tool

Каждый цветок выделен в ограничивающий прямоугольник (bounding box), координаты и метка класса автоматически сохранялись в соответствующий .txt файл в формате YOLO (нормализованные значения `class_id` `center_x` `center_y` `width` `height`). Для преодоления ограниченности исходной выборки и повышения устойчивости модели применялась комплексная аугментация: горизонтальное и вертикальное отражение (Flip) для адаптации к ориентации, изменение цветового оттенка ($\text{Hue} \pm 15\%$) для адаптации к вариациям освещенности, размытие Гаусса (Blur с коэффициентом 1%) для повышения устойчивости к легкой дефокусировке и мозаичное разбиение (Tile 5×5) исходных изображений на фрагменты (640×640 пикселя) для увеличения числа примеров изображений и обучения на различных частях участка. В результате аугментации исходный набор был расширен до 1700 изображений, а общее количество размеченных объектов класса «Flower» составило 18496, что сформировало репрезентативный датасет для обучения модели YOLO12.

Для распознавания цветков земляники садовой на полученных фрагментах использована сверточная нейронная сеть YOLO12 версия Extra Large (56,9 млн.

параметров, 194.9 GFLOPs). Обучение модели проводилось с применением техники трансферного обучения (transfer learning) для повышения точности распознавания. Гиперпараметры обучения: размер пакета данных (batch size) - 8, скорость обучения (learning rate) - 0,001, количество эпох обучения - 1500, ранняя остановка (early stopping) для предотвращения переобучения. Для фильтрации ложных срабатываний использовался алгоритм Non-Maximum Suppression (NMS), который удалял пересекающиеся ограничивающие рамки (bounding boxes) с низкой вероятностью распознавания, оставляя только наиболее точные результаты распознавания.

Для оценки качества работы модели использованы общепринятые метрики: точность (Precision), полнота (Recall), средняя точность (AP, Average Precision), F-мера (F-score), IoU (Intersection over Union) [20].

Обучение модели выполнялось на компьютере с процессором Intel Core i9-10900X (3.70 ГГц), двумя видеокартами NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti (11 Гб каждая), оперативной памятью 128 Гб DDR4 и SSD-накопителем 1 Тб (PCI-E). В работе использовались библиотеки CUDA 12.2, PyTorch (работа с нейросетевыми моделями), OpenCV (обработка

изображений и визуализация), NumPy (численные операции с массивами) и другие инструменты для обработки данных и визуализации.

Результаты и обсуждение. В ходе обучения модели YOLO12 Extra Large на специализированном датасете достигнуты высокие и стабильные метрики детекции. На 1200 эпохе обучения модель показала следующие результаты: точность (Precision) 0,909, полнота (Recall) 0,803, средняя точность при

IoU=0,5 (mAP50) 0,885 и mAP50-95 0,783. Значения функций потерь стабилизировались на уровне box_loss = 0,35, cls_loss = 0,2 и dfl_loss = 0,76, что свидетельствует об отсутствии переобучения при использовании ранней остановки. Применение ранней остановки (patience = 100) прервало обучение на эпохе 1205 из-за отсутствия улучшений метрик, при этом пик производительности достигнут на 1105 эпохе (рис. 3).

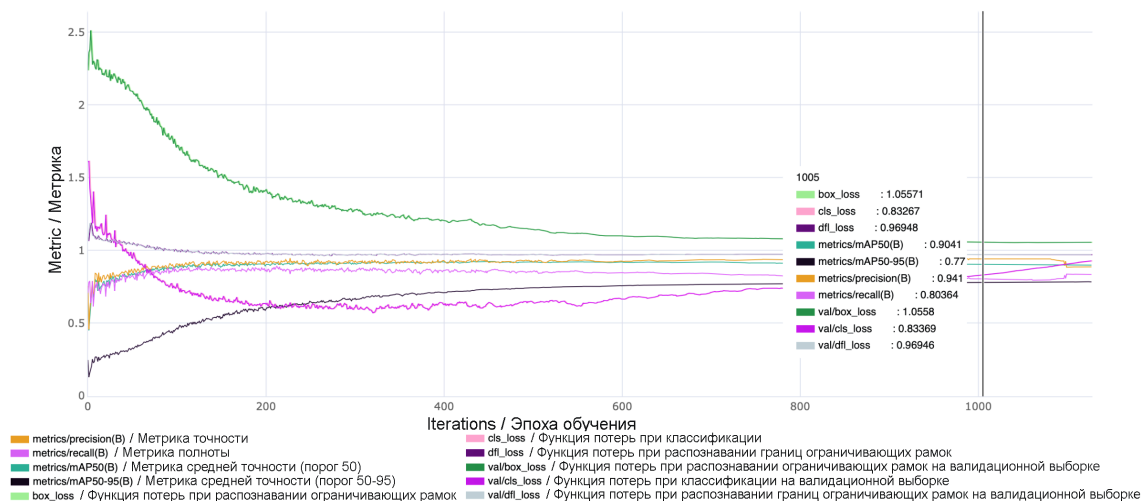


Рис. 3 – График метрик обучения модели нейронной сети
Fig. 3 – Graph of the training metrics for the neural network model

Анализ модели на тестовой выборке (250 изображений, 1393 экземпляра) выявил следующие показатели: точность (Precision) 0,903, полнота (Recall) 0,812, F-мера 0,852 (гармоническое среднее точности и полноты), mAP50 0,888 и mAP50-95 0,783. Средняя скорость обработки кадров составила 14,81 мс/кадр для фрагментов 200×200

пикселей. Полученные метрики подтверждают применимость трансферного обучения для задач распознавания объектов небольшого размера в условиях сложного фона, обеспечивая точность автоматизированного подсчета цветков.

Примеры распознавания цветков земляники садовой на отдельных плитках и ортофотоплане представлены на рисунке 4.

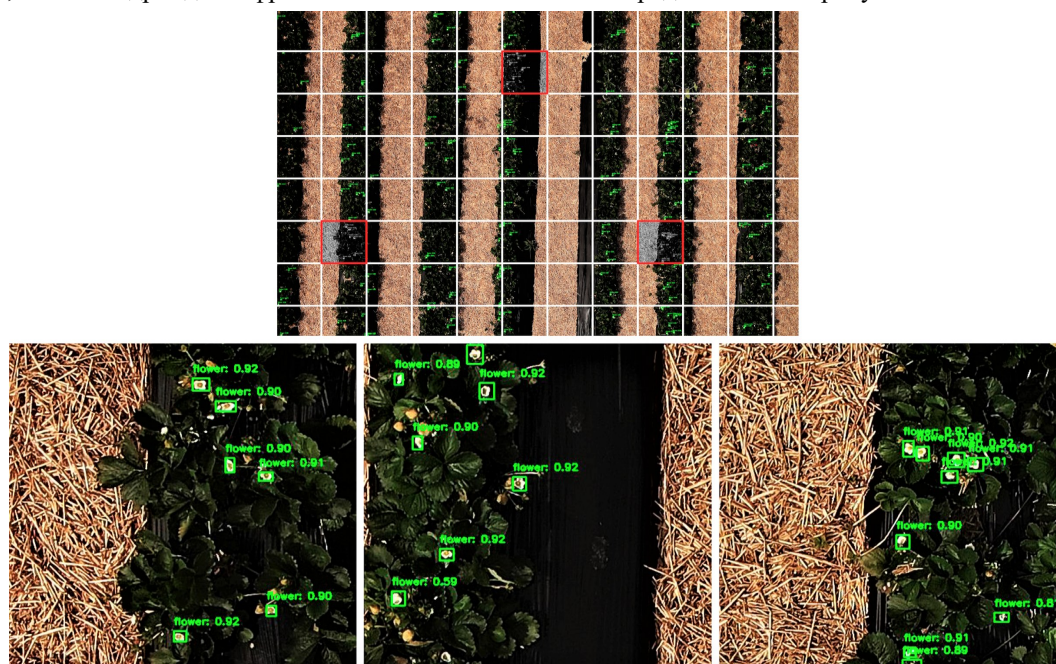


Рис. 4 – Результаты распознавания цветков земляники садовой на ортофотоплане и отдельных плитках изображения

Fig. 4 – Results of strawberry flower recognition on an orthophotomap and individual image tiles

В результате проведенных исследований разработано специализированное программное обеспечение на Python с графическим интерфейсом (библиотека PyQt5), реализующее полный цикл обработки данных, от разбиения ортофотоплана до анализа пространственного распределения цветков и прогнозирования урожайности. Графический интерфейс программы обеспечивает управление процессом обработки через систему вкладок: вкладка

визуализация для отображения исходных изображений, плиток, результатов распознавания и сшитых ортофотопланов с поддержкой масштабирования, вкладка оценка урожайности для построения тепловых карт (heat map, цветовой градиент), анализа пространственного распределения, расчета прогноза урожая, вкладка база данных (библиотека SQLite3) для хранения и анализа исторических результатов обработки (рис. 5).

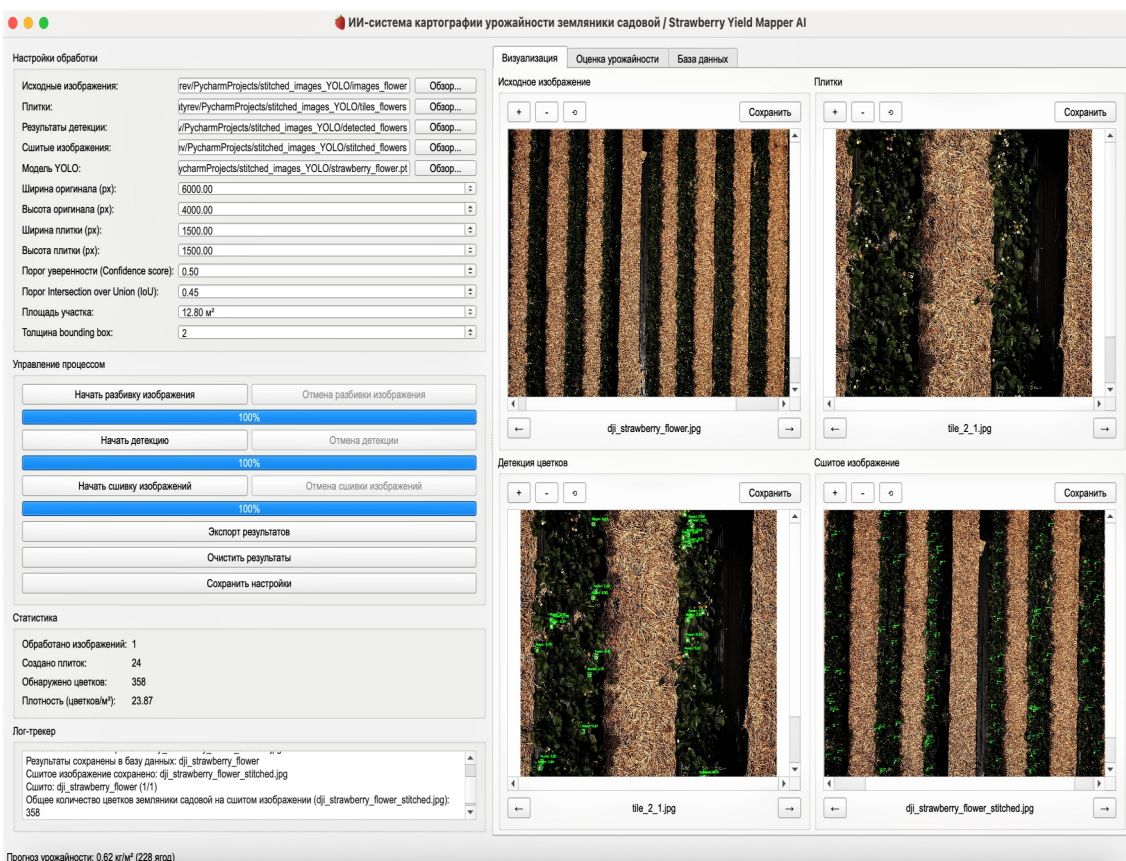


Рис. 5 – Интерфейс программы «ИИ-система картографирования урожайности земляники садовой»

Fig. 5 – Interface of the program «AI-based strawberry yield mapping system»

Программа включает в себя модуль по преобразованию изображений для автоматического разбиения ортофотоплана на фрагменты (плитки) заданного размера, управления параметрами разбиения (размер плитки, зазор между фрагментами). Модуль для распознавания цветков земляники садовой с помощью модели сверточной нейронной сети YOLO12, а также настройку порогов уверенности модели (confidence threshold) и IoU, визуализация результатов детекции с bounding boxes. Реализована поддержка пользовательских моделей (возможность загрузки файлов .pt через интерфейс) для обработки полученных данных, сшивки обработанных фрагментов в единое изображение с суммированием количества цветков и экспорта координат в формате GIS (Geographic Information System) (формула 1):

$$N_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n n_i \quad (1)$$

где n_i - количество цветков на i -м фрагменте, шт, n - общее количество фрагментов, шт.

Для анализа пространственного распределения цветков на вкладке оценка урожайности проводится построение тепловой карты плотности цветков (рис. 6). Тепловая карта представляет собой визуализацию пространственного распределения плотности цветков земляники садовой на ортофотоплане [13]. Холодные цвета (синий) обозначают зоны с низкой плотностью цветков, теплые цвета (желтый, оранжевый, красный) показывают участки с высокой концентрацией цветков. Визуализация создается путем преобразования координат распознанных цветков в матрицу плотности с последующим наложением цветового градиента (от синего к красному) на исходное изображение, что позволяет агроному идентифицировать зоны неоднородной продуктивности.

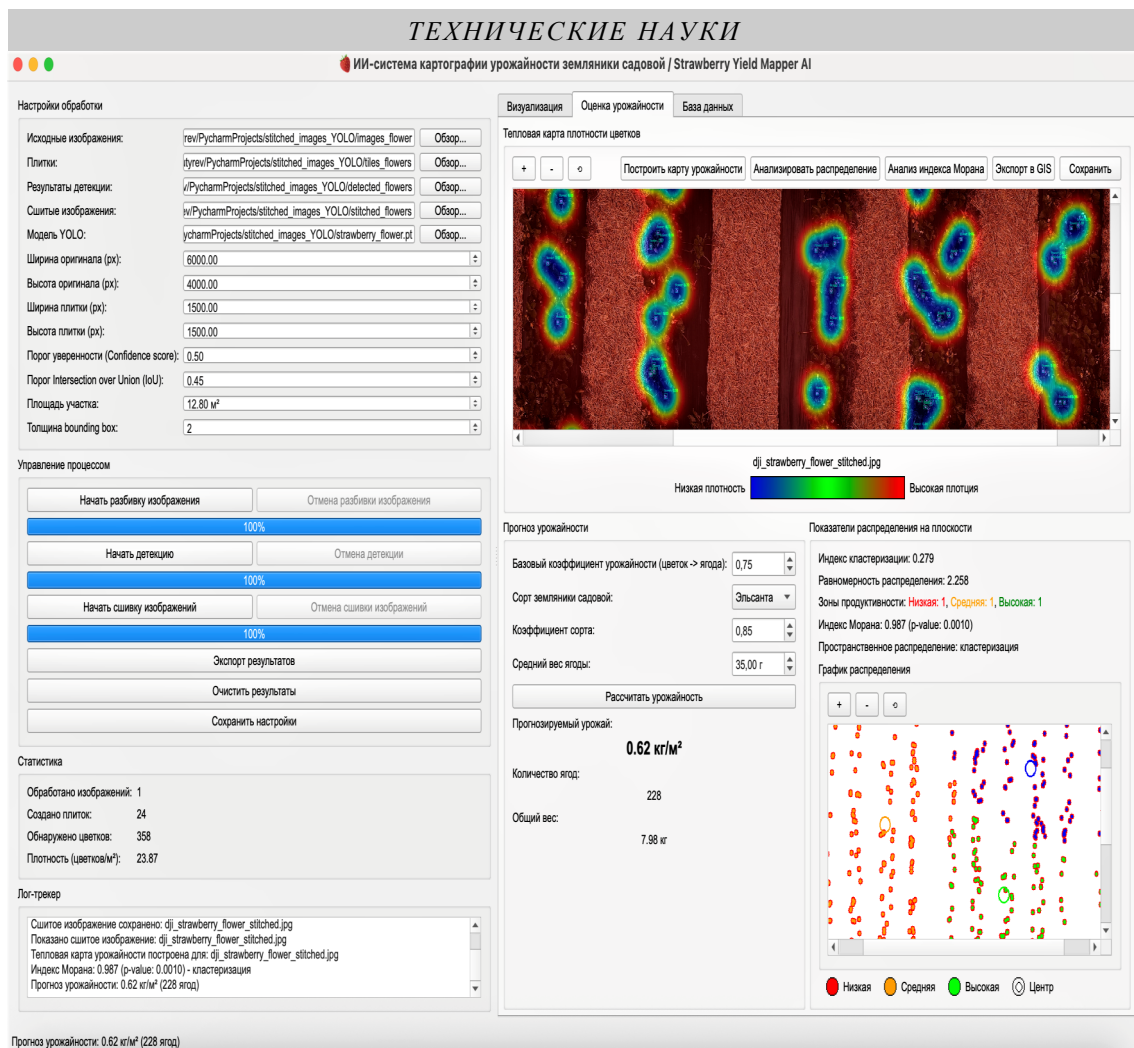


Рис. 6 – Вкладка оценка урожайности, результаты построение тепловой карты урожайности, расчета индекса Морана и кластерного анализа

Fig. 6 – Yield assessment tab, results of yield heatmap generation, Moran's I index calculation, and cluster analysis

Реализован расчет индекса Морана (библиотека esda) для оценки пространственной автокорреляции (формула 2):

$$I = \frac{n}{\sum_i \sum_j \omega_{ij}} \cdot \frac{\sum_i \sum_j \omega_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

Где n - число наблюдений, w_{ij} - элементы матрицы пространственных весов, x_i и x_j - значение в точках i и j , $\bar{x}$ - среднее значение.

При $I = 0,8$ ($p < 0,01$) сильная кластеризация, при $I = -0,3$ ($p < 0,05$) умеренное равномерное распределение.

Также проводится кластерный анализ методом K-means (библиотека scikit-learn) для выделения зон продуктивности (низкая/средняя/высокая) и визуализация диаграмм Вороного (библиотека SciPy) для оценки равномерности распределения. Индекс равномерности рассчитывается как коэффициент вариации площадей ячеек (формула 3):

$$U = \frac{\sigma A}{\mu A} \quad (3)$$

где σA - СКО площадей ячеек Вороного, m^2 , μA - средняя площадь, m^2 .

Прогнозирование урожайности проводится с учетом сортовых коэффициентов (Эльсанта – 0,85, Альба – 0,75, Хоней – 0,80 и др.). Расчет прогноза урожая проводится на основе количества распознанных цветков, среднего веса ягоды и площади участка (формула 4).

$$Y = \frac{N \cdot C_f \cdot V_f \cdot W_{avg}}{A} \quad (4)$$

где N - количество цветков, шт, C_f - базовый коэффициент преобразования, V_f - коэффициент сорта, W_{avg} - средний вес ягоды, г, A - площадь, m^2 .

Реализована поддержка параллельных вычислений через CUDA. Средняя скорость обработки кадров составляет ~67,5 FPS (плитка 200×200 px - 0,3125 кадр/сек) на видеокарте RTX 2080 Ti. В процессе работы программы ведется автоматическое ведение лога процессов.

На основе анализа пространственного распределения цветков земляники садовой с использованием разработанной ИИ-системы определены следующие закономерности. Выявленная кластеризация цветков земляники

садовой (индекс Морана = 0,987, $p < 0,01$) свидетельствует о значительной неоднородности продуктивности на участке (ортофотоплане) площадью 12,8 м². Высокий коэффициент вариации площадей ячеек Вороного ($U = 2,258$) подтверждает неравномерность распределения цветков, что коррелирует с особенностями почвенных условий или особенностями сорта. Прогнозная урожайность рассчитана с учетом сортового коэффициента, количества распознанных цветков (228 шт/м²) и среднего веса ягоды (35 г), составила 0,62 кг/м². Полученные данные позволяют определять зоны сниженной продуктивности (кластеры с индексом 0,279) для оптимизации выполнения технологических операций по уходу за насаждениями и подтверждают эффективность использования пространственного анализа с нейросетевым распознаванием.

Проведённое исследование показывает превосходство разработанного метода по метрикам распознавания цветков земляники садовой в сравнении с зарубежными аналогами. При разрешении съёмки 0,570 мм/пиксель архитектура YOLO12 Extra Large обеспечила значение метрики mAP50 на уровне 0,888, что на 5,8% превышает результат Faster R-CNN при сопоставимых условиях съёмки [1]. Более высокая точность подсчёта цветков (90,3% против 84,1%) достигнута при меньшем уровне взаимных перекрытий объектов (<5% против 13,5%), что обусловлено применением в исследованиях комплексной аугментации данных и оптимизированной предобработки ортофотоплана.

В отличие от легковесной гибридной сети VM-YOLO [2] обученная нами модель обеспечивает более высокую точность при сохранении вычислительной эффективности (~67,5 кадров/сек).

Метод, основанный на распознавании цветоложа [3] с последующим байесовским моделированием вероятности плодоношения, хотя и обоснован с биологической точки зрения, уступает по точности распознавания (метрика mAP 0,6587) и требует дополнительных этапов статистической обработки для прогнозирования урожайности. Он обеспечивает косвенную оценку потенциального урожая через вероятностное преобразование, а предлагаемый нами метод обеспечивает прямой подсчёт цветков с высокой точностью и встроенный механизм прогнозирования через сортовые коэффициенты, что сокращает время принятия

агротехнических решений.

Выводы. Разработанная программа «ИИ-система картографирования урожайности земляники садовой» решает актуальную задачу автоматизации мониторинга цветения земляники садовой с использованием БЛА и глубокого обучения, подсчета цветков земляники садовой на больших площадях в условиях высокой плотности насаждений для прогноза урожайности на ранних стадиях вегетации, снижая трудозатраты и повышая масштабируемость мониторинга. Применение современной архитектуры YOLO12 в сочетании с алгоритмами пространственного анализа обеспечивает высокую точность детекции (метрика средней точности mAP50 = 0,904 на 1105 эпохе обучения) и позволяет выявлять зоны неоднородности цветения. Метод обеспечил точность автоматизированного подсчета на уровне 90,3% (метрика Precision) и позволил выявить выраженную пространственную кластеризацию цветков (индекс Морана = 0,987) на исследованном участке.

Применение методов аугментации данных, таких как горизонтальное и вертикальное отражение (Flip), изменение цветового оттенка (Hue $\pm 15\%$), размытие Гаусса (Blur с коэффициентом 1%), мозаичное разбиение (Tile 5×5), позволило улучшить адаптивность модели к реальным условиям съёмки и повысить качество распознавания и классификации.

Модуль программы для прогнозирования урожайности с учетом сортовых особенностей создает основу для принятия агротехнических решений. На тестовых данных прогнозная урожайность составила 0,62 кг/м² при плотности цветения 228 шт/м². Предложенный метод существенно сокращает трудозатраты при оценке продуктивности и может быть адаптирован для других сельскохозяйственных культур с выраженными морфологическими признаками. Дальнейшее развитие метода предполагает уточнение моделей прогнозирования урожайности на основе биологических параметров сортов и динамики роста растений, что сделает систему еще более точной и адаптивной для задач цифрового мониторинга. Интеграция данных, полученных с БЛА и разработанной ИИ-системы, с системами управления сельскохозяйственной техникой позволит оптимизировать выполнение технологических операций (дифференцированное внесение удобрений, средств защиты растений) в режиме реального времени.

Литература

1. Динамика производства ягод земляники садовой по странам мира / В. Н. Ожерельев, М. В. Ожерельева, А. М. Гринь и др. // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. №4(74). С. 60–66.
2. Марченко Л.А. Продуктивность земляники садовой и селекционные возможности ее повышения // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2021. №51(3). С. 65–74. doi: 10.26898/0370-8799-2021-3-7
3. Кутырёв А.И., Филиппов Р.А. Применение сверточной нейронной сети для мониторинга состояния земляники садовой // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023. Т.24. №4. С. 685–696. doi: 10.30766/2072-9081.2023.24.4.685-696
4. Разработка системы автоматизированного управления агротехнологиями в садоводстве / Д.О. Хорт, А.И. Кутырёв, И.Г. Смирнов и др. // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т.15. №2. С. 61–68. doi: 10.22314/2073-7599-2021-15-2-61-68

5. Кутырёв А.И., Смирнов И.Г., Андриянов Н.А. Сравнительный анализ моделей нейронных сетей для распознавания плодов яблони на кроне дерева // Садоводство и виноградарство. 2023. №5. С.56–63. doi: 10.31676/0235-2591-2023-5-56-63
6. VM-YOLO: YOLO with VMamba for Strawberry Flowers Detection / Y. Wang, X. Lin, Z. Xiang, et al. // Plants. 2025. 14(3):468. doi: 10.3390/plants14030468
7. Strawberry Detection and Ripeness Classification Using YOLOv8+ Model and Image Processing Method / C. Wang, H. Wang, Q. Han, et al. // Agriculture 2024. 14(5):751. doi: 10.3390/agriculture14050751
8. Estimation of Strawberry Canopy Volume in Unmanned Aerial Vehicle RGB Imagery Using an Object Detection-Based Convolutional Neural Network / M-S. Gang, T. Sutthanonkul, W.S. Lee, et al. // Sensors 2024. 24(21):6920. doi: 10.3390/s24216920
9. Strawberry Yield Prediction Based on a Deep Neural Network Using High-Resolution Aerial Orthoimages / Y. Chen, W.S. Lee, H. Gan, et al. // Remote Sensing. 2019. 11(13):1584. doi: 10.3390/rs11131584
10. Improving Strawberry Yield Prediction by Integrating Ground-Based Canopy Images in Modeling Approaches / A. Abd-Elrahman, F. Wu, S. Agehara, et al. // ISPRS International Journal of Geo-Information. 2021. 10(4):239. doi: 10.3390/ijgi10040239
11. Deep learning for strawberry canopy delineation and biomass prediction from high-resolution images / C. Zheng, A. Abd-Elrahman, V.M. Whitaker, et al. // Plant Phenomics. 2022. 9850486. doi: 10.34133/2022/9850486
12. Yue Y., Xu S., Wu H.A. Strawberry Ripeness Detection Method Based on Improved YOLOv8 // Applied Sciences. 2025. 15(11):6324. doi: 10.3390/app15116324
13. YOLOv5-ASFF: A Multistage Strawberry Detection Algorithm Based on Improved YOLOv5 / Y. Li, J. Xue, M. Zhang, et al. // Agronomy. 2023. 13(7):1901. doi: 10.3390/agronomy13071901
14. Lightweight Improved YOLOv5s-CGHOSTNET for Detection of Strawberry Maturity Levels and Counting / N. Tamrakar, S. Karki, MY. Kang, et al. // AgriEngineering. 2024. 6(2):962-978. doi: 10.3390/agriengineering6020055
15. Research on the Strawberry Recognition Algorithm Based on Deep Learning / Y. Zhang, L. Zhang, H. Yu, et al. // Applied Sciences. 2023. 13(20):11298. doi: 10.3390/app132011298
16. Prediction of strawberry yield based on receptacle detection and Bayesian inference / S. Yoon, J.S. Jo, S.B. Kim, et al. // Heliyon. 2023. Vol. 9. No. 3. P. e14546. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14546
17. Diwan T., Anirudh G., Tembhurne J.V. Object detection using YOLO: Challenges, architectural successors, datasets and applications // Multimed. Tools Appl. 2023. No. 82. P. 9243-9275. doi: 10.1007/s11042-022-13644-y
18. D-YOLO: A Lightweight Model for Strawberry Health Detection / E. Wu, R. Ma, D. Dong, et al. // Agriculture. 2025. 15(6):570. doi: 10.3390/agriculture15060570
19. A deep-level region-based visual representation architecture for detecting strawberry flowers in an outdoor field / P. Lin, W.S. Lee, Y.M. Chen, et al. // Precision Agric. 2020. 21. P. 387–402. doi: 10.1007/s11119-019-09673-7
20. Maxwell A.E., Warner T.A., Guillén L.A. Accuracy Assessment in Convolutional Neural Network-Based Deep Learning Remote Sensing Studies - Part 1: Literature Review // Remote Sensing. 2021. 13(13):2450. doi: 10.3390/rs1313245

References

1. Ozherelev VN, Ozhereleva MV, Grin AM. [Dynamics of garden strawberry production in the countries of the world]. Vestnik Bryanskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2019; 4(74). 60-66 p.
2. Marchenko L.A. [Productivity of garden strawberries and breeding potential for their improvement]. Sibirskiy vestnik selskokhozyaystvennoy nauki. 2021; 51(3). 65-74 p. doi: 10.26898/0370-8799-2021-3-7
3. Kutyrev AI, Filippov RA. [Application of convolutional neural network for monitoring the condition of garden strawberries]. Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka. 2023; Vol.24. 4. 685-696 p. doi: 10.30766/2072-9081.2023.24.4.685-696
4. Khort DO, Kutyrev AI, Smirnov IG. [Development of an automated management system for agricultural technologies in horticulture]. Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii. 2021; Vol.15. 2. 61-68 p. doi: 10.22314/2073-7599-2021-15-2-61-68
5. Kutyrev AI, Smirnov IG, Andriyanov NA. [Comparative analysis of neural network models for recognizing apple fruits on a tree crown]. Sadovodstvo i vinogradarstvo. 2023; 5. 56-63 p. doi: 10.31676/0235-2591-2023-5-56-63
6. Wang Y, Lin X, Xiang Z, VM-YOLO: YOLO with VMamba for strawberry flowers detection. Plants. 2025; 14(3). 468 p. doi: 10.3390/plants14030468
7. Wang C, Wang H, Han Q. strawberry detection and ripeness classification using YOLOv8+ model and image processing method. Agriculture. 2024; 14(5). 751 p. doi: 10.3390/agriculture14050751
8. Gang M-S, Sutthanonkul T, Lee WS. Estimation of strawberry canopy volume in unmanned aerial vehicle RGB imagery using an object detection-based convolutional neural network. Sensors. 2024; 24(21). 6920 p. doi: 10.3390/s24216920
9. Chen Y, Lee WS, Gan H. Strawberry yield prediction based on a deep neural network using high-resolution aerial orthoimages. Remote Sensing. 2019; 11(13). 1584 p. doi: 10.3390/rs11131584
10. Abd-Elrahman A, Wu F, Agehara S. Improving strawberry yield prediction by integrating ground-based canopy images in modeling approaches. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2021; 10(4). 239 p. doi: 10.3390/ijgi10040239
11. Zheng C, Abd-Elrahman A, Whitaker VM. Deep learning for strawberry canopy delineation and biomass prediction from high-resolution images. Plant Phenomics. 2022; 9850486. doi: 10.34133/2022/9850486
12. Yue Y, Xu S, Wu HA. Strawberry ripeness detection method based on improved YOLOv8. Applied Sciences. 2025; 15(11). 6324 p. doi: 10.3390/app15116324
13. Li Y, Xue J, Zhang M. YOLOv5-ASFF: a multistage strawberry detection algorithm based on improved YOLOv5. Agronomy. 2023; 13(7). 1901 p. doi: 10.3390/agronomy13071901
14. Tamrakar N, Karki S, Kang MY. Lightweight improved YOLOv5s-CGHOSTNET for detection of strawberry maturity levels and counting. AgriEngineering. 2024; 6(2). 962-978 p. doi: 10.3390/agriengineering6020055

15. Zhang Y, Zhang L, Yu H. Research on the strawberry recognition algorithm based on deep learning. *Applied Sciences*. 2023; 13(20). 11298 p. doi: 10.3390/app132011298
16. Yoon S, Jo JS, Kim SB. Prediction of strawberry yield based on receptacle detection and Bayesian inference. *Heliyon*. 2023; Vol.9. No.3. e14546 p. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14546
17. Diwan T, Anirudh G, Tembhurne JV. Object detection using YOLO: challenges, architectural successors, datasets and applications. *Multimed. Tools Appl.* 2023; No.82. 9243-9275 p. doi: 10.1007/s11042-022-13644-y
18. Wu E, Ma R, Dong D. D-YOLO: a lightweight model for strawberry health detection. *Agriculture*. 2025; 15(6). 570 p. doi: 10.3390/agriculture15060570
19. Lin P, Lee WS, Chen YM. A deep-level region-based visual representation architecture for detecting strawberry flowers in an outdoor field. *Precision Agric.* 2020; 21. 387-402 p. doi: 10.1007/s11119-019-09673-7
20. Maxwell AE, Warner TA, Guillen LA. Accuracy assessment in convolutional neural network-based deep learning remote sensing studies - Part 1: literature review. *Remote Sensing*. 2021; 13(13). 2450 p. doi: 10.3390/rs1313245

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Кутырёв Алексей Игоревич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела технологий и машин для садоводства, виноградарства и питомниководства Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, пр-д 1-й Институтский, д.5), e-mail: alexeykutyrev@gmail.com, ORCID 0000-0001-7643-775X

Филиппов Ростислав Александрович – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник отдела технологий и машин для садоводства, виноградарства и питомниководства Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, пр-д 1-й Институтский, д.5), e-mail: rostislav-filippov@yandex.ru, ORCID 0000-0003-3586-3634

Вклад авторов:

А.И. Кутырёв - формулирование идеи, гипотезы, цели исследования, создание программного обеспечения, скриптов, алгоритмов, статистический или теоретический анализ данных, редактирование, доработка текста;

Р.А. Филиппов - разработка методов и процедур, проверка результатов, воспроизводимости, проведение экспериментов, сбор данных, управление данными: подготовка, аннотирование, хранение, написание первоначального текста статьи, создание графиков, схем и иллюстраций.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 25.07.2025; одобрена после рецензирования 22.02.2026; принята к публикации 01.04.2026.

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

Authors:

Kutyrev Aleksey Igorevich – Ph.D. of Technical Sciences, leading researcher of Department of Technologies and Machines for Horticulture, Viticulture and Nursery Federal Scientific Agroengineering Center VIM (1st Institutskiy Proyezd, Building 5, Moscow, 109428, Russian Federation), e-mail: alexeykutyrev@gmail.com, ORCID 0000-0001-7643-775X

Filippov Rostislav Aleksandrovich – Ph.D. Agricultural Sciences, leading researcher of Department of Technologies and Machines for Horticulture, Viticulture and Nursery Federal Scientific Agroengineering Center VIM (1st Institutskiy Proyezd, Building 5, Moscow, 109428, Russian Federation), e-mail: rostislav-filippov@yandex.ru, ORCID 0000-0003-3586-3634

Contribution of the authors:

A.I. Kutyrev — Conceptualization (idea formulation, hypothesis and research objectives), Software development, scripting, Algorithm design, Statistical and theoretical data analysis, Manuscript editing and revision;

R.A. Filippov — Methodology (development of methods and procedures), Validation (results verification and reproducibility), Experimentation, Data acquisition, Data management (preparation, annotation, storage), Initial draft writing, Creation of graphs, diagrams, and illustrations.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 25.07.2025; revised 22.02.2026; accepted 01.04.2026.



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНО-ЗЕРНОВОЙ СМЕСИ В ПНЕВМОЗАГРУЗОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ ПРОТРАВЛИВАТЕЛЯ СЕМЯН ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

© 2026 Нуруллин Э. Г. ✉, Файзуллин Р. А., Фасхиев Р. Ф.

Казанский государственный аграрный университет
(г. Казань, Российская Федерация)
✉ nureg@mail.ru

Реферат. Разработана математическая модель движения воздушно-зерновой смеси в загрузочном устройстве пневматического типа, впервые предложенного для оснащения протравливателей семян зерновых культур. Моделирование выполнено в режиме движения семян зерновых культур во взвешенном состоянии. Получено уравнение движения семян, позволяющее теоретически описать траекторию зерна в пневмосемяпроводе, которое в перспективе будет использовано для теоретического обоснования конструктивно-технологических параметров пневмосемяпровода, обеспечивающего качественное перемещение семян при требуемой пропускной способности и минимальной энергоёмкости. Получены новые теоретические зависимости и определены параметры движения воздушно-зерновой смеси в наклонном пневмосемяпроводе пневмозагрузочного устройства. Исследования проводились для семян зерновых культур со скоростями витания 5–20 м/с при углах наклона пневмосемяпровода 30–75° и диаметрах 0,05–0,25 м. Определено, что для семян с маленькой критической скоростью (5 м/с) при угле наклона пневмосемяпровода 30° минимальная скорость воздуха должна быть 10,0 м/с, при 45° – 7,1 м/с, при 60° – 5,8 м/с, при 75° – 5,2 м/с, а для семян с максимальной критической скоростью (20 м/с) при 30° – 40,0 м/с, при 45° – 28,3 м/с, при 60° – 23,1 м/с, при 75° – 20,8 м/с. Установлено, что для качественного перемещения семян с высокой критической скоростью (20 м/с) расход воздуха при увеличении диаметра от 0,05 м до 0,25 м при угле наклона пневмосемяпровода 45° возрастает от 0,08 до 0,99 м³/с, при 60° от 0,06 до 0,86 м³/с, при 75° от 0,05 до 0,76 м³/с. Полученные теоретические результаты будут использованы при конструировании пневмозагрузочного устройства для протравливателей семян.

Ключевые слова: машины для защиты растений, протравливатели семян зерновых культур, пневмозагрузочное устройство.

Для цитирования: Нуруллин Э.Г., Файзуллин Р.А., Фасхиев Р.Ф. Математическая модель движения воздушно-зерновой смеси в пневмозагрузочном устройстве протравливателя семян зерновых культур // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 79–88. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-79-88

MATHEMATICAL MODEL OF AIR-GRAIN MIXTURE MOVEMENT IN PNEUMO-LOADING DEVICE OF GRAIN SEED TREATER

© 2026 Nurullin E.G. ✉, Fayzullin R.A., Faskhiev R.F.

Kazan State Agrarian University
(Kazan, Russian Federation)
✉ nureg@mail.ru

Abstract. Mathematical model of air-grain mixture movement in a pneumatic loading device, first proposed for use in grain seed treaters, has been developed. The modeling was performed for suspended grain seed movement. An equation for seed motion has been derived that allows for a theoretical description of the grain trajectory in a pneumatic seed tube. This equation will be used in the future to theoretically substantiate the design and technological parameters of a pneumatic seed tube, ensuring high-quality seed movement with the required throughput and minimal energy consumption. New theoretical dependencies were obtained and parameters of air-grain mixture movement in the inclined pneumatic seed pipeline of the pneumatic loading device were determined. The studies were conducted for grain crop seeds with hovering speeds of 5–20 m/s at pneumatic seed tube inclination angles of 30–75° and diameters of 0.05–0.25 m. It was determined that for seeds with a low critical speed (5 m/s) at a pneumatic seed tube inclination angle of 30°, the minimum air speed should be 10.0 m/s, at 45° – 7.1 m/s, at 60° – 5.8 m/s, at 75° – 5.2 m/s, and for seeds with a maximum critical speed (20 m/s) at 30° – 40.0 m/s, at 45° – 28.3 m/s, at 60° – 23.1 m/s, at 75° – 20.8 m/s. It was found that for high-quality seed movement at a high critical speed (20 m/s), the air flow rate increases from 0.08 to 0.99 m³/s with a diameter increasing from 0.05 m to 0.25 m at a pneumatic seed tube inclination of 45°, from 0.06 to 0.86 m³/s at 60°, and from 0.05 to 0.76 m³/s at 75°. Theoretical results obtained will be used in the design of a pneumatic loading device for seed treaters.

Key words: plant protection machines, grain seed treaters, pneumatic loading device.

For citation: Nurullin EG, Fayzullin RA, Faskhiev RF. [Mathematical model of air-grain mixture movement in pneumo-loading device of grain seed treater]. Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2026; Vol. 21. 1(81). 79–88 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-79-88

Введение. Производство зерна наиболее эффективное направление сельскохозяйственного производства, которое обеспечивает стабильное и гарантированное получение востребованной внутренним и внешними рынками продукции [1, 2].

Одним из основных факторов, определяющих количество и качество производимого зерна является качество семян, главным из которых выступает генетический потенциал, формируемый в процессе селекции. Современные селекционные достижения в области зерновых культур гарантируют их устойчивость и адаптивность к различным рискам, возросших с изменениями природно-климатических и почвенных условий [3, 4, 5].

Однако в процессе технологии производства зерна и подготовки семян полная реализация генетического потенциала не достигается [6, 7]. Это обусловлено рядом производственных факторов, одним из которых является микротравмирование репродуктивных органов семян зерновых культур во время обработки в сельскохозяйственных машинах на всех этапах производства зерна и подготовки семян, что приводит к снижению количества и качества урожая [8].

Предпосевная обработка семян защитными средствами в зернопроизводстве является ключевым этапом [9, 10, 11]. Она преимущественно выполняется на мобильных протравочных машинах, оборудованных шнековыми загрузочными и разгрузочными устройствами, которые часто приводят к повреждению зерна. По нашим исследованиям микротравмирование семян на протравливателях с такими загрузчиками степень микротравмирования возрастает на 6...8 % [8].

По нашей гипотезе одним из путей решения данной проблемы является создание и внедрение протравочных машин с пневмозагрузочными устройствами [12]. Анализ существующих конструкций протравочных машин и результаты выполненных патентных исследований показывает, что в настоящее время в мире отсутствуют конструкции, оснащённые загрузчиками семян пневматического типа.

Данная работа невозможна без теоретического обоснования основных конструктивно-технологических параметров новых загрузочных конструкций.

Цель данной работы – разработка теоретической основы для обоснования конструктивно-технологических параметров пневматической системы загрузки семян в протравливатель. Ключевым методом выступает математическое моделирование движения воздушно-зерновой смеси в его рабочей полости.

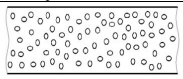
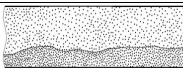
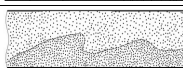
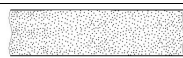
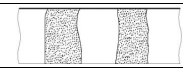
Условия, материалы и методы. На основе изучения состояния вопроса, патентных исследований, производственного опыта разработана новая конструктивно-технологическая схема пневмозагрузочного устройства для мобильных протравливателей зерновых культур, направленная на минимизацию механических повреждений зерна при обработке. Конструктивное решение обладает универсальной совместимостью с различными моделями передвижных протравочных агрегатов как российского, так и иностранного производства. Инновационный характер пневматических загрузочных систем для семян документально подтвержден серией из четырёх патентов Российской Федерации (2808241, 2762919, 2692642, 184960), что свидетельствует о наличии существенных отличий от известных аналогов.

Конструкция пневматического загрузочного устройства включает следующие ключевые компоненты: генератор воздушного потока, пневмосемяпровод по которому перемещается воздушно-зерновая смесь и бункер-разгрузитель для отделения семян от воздуха [12].

Для снижения травмирующего воздействия на семена и количества энергии, затрачиваемой на перемещение воздушно-зерновой смеси пневмосемяпровод представляет собой трубу с круглым сечением и гладкой внутренней поверхностью, изготовленный из упругого материала с высокой износостойкостью.

Перемещение семян в пневмосемяпроводе происходит в условиях пневмотранспорта твердых материалов, которые могут иметь несколько режимов (табл. 1).

Таблица 1 – Режимы пневмотранспорта твёрдых частиц
Table 1 – Modes of pneumatic transport of solid particles

Состояние потока	Рисунок потока
Взвешенное (применяется для зернистого и порошкового материала с эквивалентным диаметром (d_3) более 1 мм, т.е. $d_3 > 1$ мм)	
Осажденное (применяется для зернистого и порошкового материала, $d_3 \leq 1$ мм)	
Осажденное с дюнами (применяется для зернистого и порошкового материала, $d_3 \leq 1$ мм)	
Сплошной (аэрированный) (применяется для порошкового и мелкодисперсного материала)	
Импульсно-поршневой (применяется для порошкового материала)	
Поршневой (применяется для зернистого, порошкового и кускового материала ($d_3 = 1 \dots 15$ мм))	

Для точного моделирования движения воздушно-зерновой смеси в пневмосемяпроводе пневмозагрузочного устройства в протравливателе семян необходимо правильно определить режим пневмотранспорта. Анализ гидродинамических свойств потока показал, что они напрямую связаны с физико-механическими характеристиками и геометрическими параметрами семян, которые транспортируются. Для зерновых культур (пшеница, ячмень, овёс, горох, тритикале и др.), представляющих собой полидисперсные гранулированные среды с характерным размером частиц ($d_z > 1$ мм), оптимальным признаком режим движения семян во взвешенном состоянии.

Вторым немаловажным условием выступает обеспечение требуемой производительности с минимальными затратами энергии, которые зависят от концентрации воздушно-зерновой смеси и скорости движения семян.

Теоретически обоснованные параметры легли в основу компьютерного моделирования динамики воздушно-зерновой смеси в пневмосемяпроводе пневмозагрузочного устройства протравливателя семян.

Исследования велись с применением комплексного методического подхода, который включал использование общих методов математики, аэродинамики, теоретической механики, частных методов земледельческой механики, пневмотранспорта, а также специфические методы, и материалы, полученные при исследованиях пневматических и пневмомеханических рабочих органов сельскохозяйственных машин [13, 14]. Использованы также некоторые методические и теоретические подходы исследований двухфазных сред [15, 16, 17].

Объектом исследования является пневмозагрузочное устройство новых конструкций протравливателей семян зерновых культур (патенты Российской Федерации 2808241, 2762919, 2692642, 184960).

Предмет исследования – процесс движения воздушно-зерновой смеси в пневмозагрузочном устройстве. Исследования проводились в Казанском государственном аграрном университете с 2018 по 2005 годы при выполнении работ по темам диссертаций и грантов Министерства сельского хозяйства и

продовольствия Республики Татарстан.

Исследования проводились в следующей последовательности: выявление повреждения семян в сельскохозяйственных машинах, что снижает урожайность зерновых культур; определение степени травмированности семян зерновых культур в протравочных машинах, в результате которой выявлено, что одним из основных рабочих органов приводящих к сильному микротравмированию репродуктивных анатомических частей являются шнековые загрузочные устройства; проведение патентного поиска конструкций протравливателей семян, по результатам которой разработана новая конструкция пневмозагрузочного устройства; теоретическое обоснование основных конструктивно-технологических параметров протравочных машин с пневмозагрузочным устройством, некоторые результаты которых представлены в данной работе.

Результаты и обсуждение. *Динамика движения воздушно-зерновой смеси в пневмосемяпроводе.*

В процессе транспортировки частиц в воздушной среде наблюдается взаимодействие двух доминирующих сил: силы тяжести и аэродинамического сопротивления воздушного потока. В восходящем вертикальном воздушном потоке эти силы направлены по одной линии в разные стороны. В случае горизонтального потока сила тяжести действует перпендикулярно направлению силы воздушного потока.

Движение воздушно-зерновой смеси в пневмосемяпроводе имеет специфику, что обусловлено наклонной траекторией восходящего потока. Подобные условия транспортировки требуют пересмотра существующих теоретических моделей и разработки специализированного математического аппарата для описания движения воздушно-зерновой смеси в пневмосемяпроводе. Рассмотрим силы, действующие на зерно при движении в воздушном потоке в рабочей полости пневмосемяпровода установленным под некоторым углом к горизонту в плоской системе координат XOY, ось OX которой совпадает с осевой линией пневмосемяпровода и направлением воздушного потока (рис. 1).

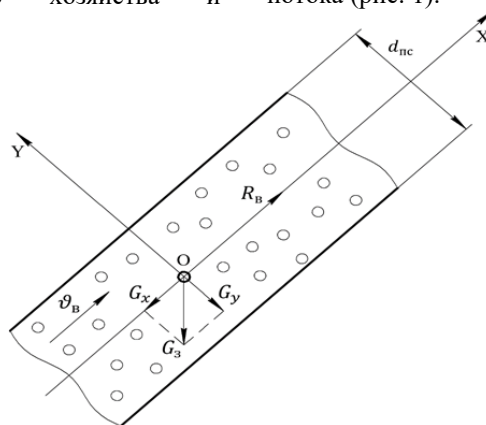


Рис. 1 – Силы, действующие на зерно при движении в пневмосемяпроводе
Fig. 1 – Forces acting on a grain during movement in a pneumatic seed duct

На зерно массой m_3 действуют сила воздушного потока R_b и сила тяжести G_3 , линии действия которых не совпадают. Рассмотрим дифференциальные уравнения движения зерна в координатной плоскости XOY, где ось OX совпадает с осевой линией пневмосемяпровода и направлением воздушного потока. При разложении силы тяжести на составляющие по осям OX и OY дифференциальные уравнения запишутся в следующих видах:

$$m_3 \frac{d^2 x}{dt^2} = R_b - G_x, \quad (1)$$

$$m_3 \frac{d^2 y}{dt^2} = G_y, \quad (2)$$

где m_3 – масса одного зерна, кг.

Сила действия воздушного потока на зерно определяется по зависимости:

$$R_b = 0,5 m_3 k_n (\vartheta_b - \vartheta_3)^2, \quad (3)$$

где k_n – коэффициент парусности семян, $\frac{1}{m}$ (определяется экспериментально, значения k_n для многих видов семян зерновых культур также имеются в справочниках); ϑ_b – скорость воздушного потока, м/с; ϑ_3 – скорость движения семян в пневмосемяпроводе, м/с.

Составляющие силы тяжести $G_3 = m_3 g$ на оси OX и OY определяются по формулам:

$$G_{3x} = G_3 \sin \alpha = m_3 g \sin \alpha, \quad (4)$$

$$G_{3y} = G_3 \cos \alpha = m_3 g \cos \alpha, \quad (5)$$

где α – угол установки пневмосемяпровода относительно горизонта (угол наклона пневмосемяпровода), град.

Подставляя (3) и (4) в (1), также (5) в (2) получаем систему дифференциальных уравнений, описывающих траекторию движения зерна в пневмосемяпроводе под воздействием воздушного потока:

$$m_3 \frac{d^2 x}{dt^2} = 0,5 m_3 k_n (\vartheta_b - \vartheta_3)^2 - m_3 g \sin \alpha; \quad (6)$$

$$m_3 \frac{d^2 y}{dt^2} = m_3 g \cos \alpha. \quad (7)$$

Примем допущение, что скорость движения зерна остаётся постоянной. т.е. $\vartheta_3 = const$. Тогда после решения дифференциальных уравнений, получаем выражения описывающие координаты единичной зерновки при движении в пневмосемяпроводе в координатной плоскости XOY:

$$X = 0,5 k_n t^2 (\vartheta_b - \vartheta_3)^2 - g t^2 \sin \alpha; \quad (8)$$

$$Y = g t^2 \cos \alpha. \quad (9)$$

Выражая из уравнения (9) время ($t^2 = \frac{Y}{g \cos \alpha}$) и подставляя в уравнение (8) имеем:

$$X = 0,5 \frac{k_n Y}{g \cos \alpha} (\vartheta_b - \vartheta_3)^2 - Y \tan \alpha. \quad (10)$$

Полученное выражение позволяет определить теоретическую траекторию движения

зерна в пневмосемяпроводе. Оно также может быть использовано при теоретическом обосновании конструктивно-технологических параметров пневмосемяпровода, обеспечивающих качественное перемещение семян при требуемой пропускной способности и минимальной энергоёмкости.

Уравнение (10) включает в себя скорости: зерна – ϑ_3 и воздушного потока – ϑ_b , которые являются важными параметрами определяющими пропускную способность пневмосемяпровода.

Скорость движения семян в пневмосемяпроводе.

Скорость движения семян является основным фактором, определяющим главный технологический параметр пневмосемяпровода – его пропускную способность по зерну, которая должна обеспечить производительность протравливателя. Наряду со скоростью движения семян пропускная способность пневмосемяпровода зависит от массы зерна в нём и от площади сечения его рабочей полости. Скорость зерна зависит от его аэродинамических свойств и скорости воздушного потока.

Масса зерна, транспортируемого в пневматическом канале определяется тремя ключевыми факторами: натурой (объёмная масса), объёмной концентрацией (степень заполнения единицы объема полости пневмосемяпровода) и режимом потока воздушно-зерновой смеси.

Единица объема семян, движущихся в пневмосемяпроводе за одну секунду – «секундный объем» рассчитывалась как произведение площади рабочего сечения канала умноженной на линейную скорость перемещения частиц и на плотность транспортируемой среды.

Для определения скорости движения зерна была установлена пропускная способность пневмосемяпровода и на основе вышеизложенных суждений формализованы полученные зависимости в виде уравнения:

$$q_{nc} = S_{nc} \vartheta_3 \gamma_3 \mu_m, \quad (11)$$

где q_{nc} – пропускная способность пневмосемяпровода, кг/с; S_{nc} – площадь поперечного сечения рабочей полости пневмосемяпровода, м²; ϑ_3 – скорость движения семян в пневмосемяпроводе, м/с; γ_3 – объёмная (насыпная) масса зерна, кг/м³; μ_m – коэффициент массовой концентрации воздушно-зерновой смеси.

Выражая из этой зависимости скорость зерна ϑ_3 и имея ввиду, что

$$S_{nc} = \frac{\pi d_{nc}^2}{4} = 0,8 d_{nc}^2$$

(где d_{nc} – диаметр рабочей полости пневмосемяпровода, м), также вычисляя числовую константу получаем:

$$\vartheta_3 = \frac{4 q_{nc}}{\pi d_{nc}^2 \gamma_3 \mu_m}. \quad (12)$$

Проанализируем полученное выражение. Пропускная способность пневмосемяпровода q_{nc} должна обеспечить семенами

максимальную производительность протравочной машины с определённым запасом. Тогда можно записать:

$$q_{\text{пс}} = k_3 \frac{Q_{\text{пм}}}{3,6}, \quad (13)$$

где $Q_{\text{пм}}$ – технологическая производительность протравливателя семян, т/ч; k_3 – коэффициент запаса пропускной способности пневмосемяпровода.

В технологических линиях по подготовке семян зерновых культур производительность предыдущих машин должна быть больше на 10-15% производительности последующей машины. Исходя из этого, для нашего случая примем, что $k_3 = 1,1$. После подстановки (13) в (12) и вычисляя общую числовую константу получим:

$$\vartheta_3 = 0,4 \frac{Q_{\text{пм}}}{d_{\text{пс}}^2 \gamma_3 \mu_0}. \quad (14)$$

Таким образом, в результате теоретического обоснования скорости движения зерна в пневмосемяпроводе получена математическая зависимость, связывающая основные технологические (скорость движения семян, производительность протравливателя, коэффициент массовой концентрации семян в пневмосемяпроводе), конструктивные параметры (диаметр рабочей полости пневмосемяпровода), также включающая технологические свойства протравливаемых семян (объёмная масса). Полученная зависимость позволяет рассчитать скорость движения семян, для обеспечения требуемой пропускной способности при заданных и (или) известных значениях других параметров, входящих в неё.

Скорость воздуха в пневмосемяпроводе.

Важным параметром является скорость воздушного потока, которая влияет на скорость зерна. Она может быть использована при теоретическом обосновании конструктивно-технологических параметров, обеспечивающих качественное перемещение семян при требуемой пропускной способности и минимальной энергоёмкости.

Характер движения воздушно-зерновой смеси в пневмосемяпроводе зависит от скорости и характера потока (ламинарный или турбулентный) транспортирующего воздуха. Характер потока оценивается по числу Рейнольдса (Re):

$$Re = \frac{\vartheta_b d_{\text{пс}}}{\nu}, \quad (15)$$

где ϑ_b – скорость воздуха в пневмосемяпроводе, м/с; $d_{\text{пс}}$ – диаметр рабочей полости пневмосемяпровода, м; ν – кинематическая вязкость воздуха при температуре 30°C и давлении 760 мм.рт.ст. (101323,2 Па), $\nu = 1,45 \cdot 10^{-5}$.

При $Re < 2320$ поток ламинарный. В нашем случае поток турбулентный, т.к. $Re > 10^5$ даже при минимально приемлемых, с точки зрения работоспособности конструкции, значениях скорости воздуха и диаметра пневмосемяпровода ($\vartheta_b = 1$ м/с, $d_{\text{пс}} = 0,1$ м). При турбулентном режиме возникают поперечные составляющие скорости и происходит интенсивное перемешивание потока воздуха. При турбулентном режиме течения в пневмосемяпроводе распределение скоростей воздушного потока описывается усечённой параболической зависимостью, при этом минимальные значения скорости наблюдаются в приграничном слое вблизи стенок. В рамках теоретического анализа в качестве расчетного параметра принималось среднее значение скорости потока $\vartheta_b = \vartheta_{\text{вср}}$ (рис. 2).

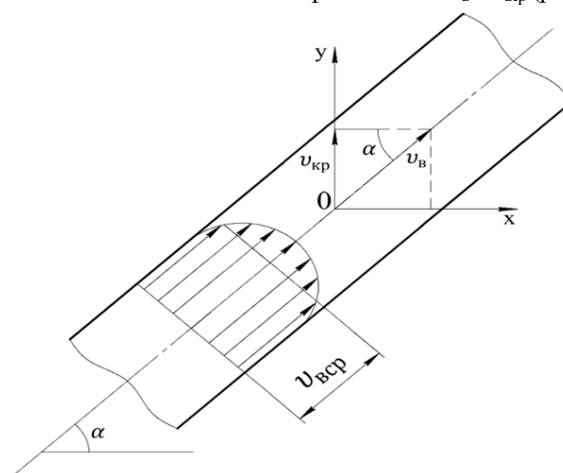


Рис. 2 – Схема составляющих скоростей воздушного потока в пневмосемяпроводе
Fig. 2 – Diagram of air flow velocity components in a pneumatic seed duct

Обоснование скорости воздушного потока проведем без учёта сопротивлений, (соответственно перепада давления) возникающих при движении воздуха в пневмосемяпроводе, т.к. длина его маленькая и имеется всего один изгиб при соединении с входящим патрубком пылеотделителя.

Для возможного перемещения семян, скорость движения воздуха должна быть больше составляющей проекции скорости витания $\vartheta_{\text{кр}}$ семян, на направление вектора скорости воздушного потока (рис. 2):

$$\vartheta_b > \frac{\vartheta_{\text{кр}}}{\sin \alpha}, \quad (16)$$

где α – угол наклона пневмосемяпровода относительно горизонта, град.; $\vartheta_{кр}$ – критическая скорость зерна, при которой они находятся в витающем состоянии в вертикальном воздушном потоке, м/с.

Критическая скорость зерна – это значение скорости воздуха, при котором зерно находится в воздушном потоке во взвешенном состоянии т.е. отсутствуют его направленное движение вверх или вниз. При такой скорости ускорение равно нулю

$$\left(\frac{dv_z}{dt} = 0\right)$$

и сила воздушного потока, действующая на зерновку равна её силе тяжести ($G_z = m_z g$). Критическая скорости семян основных зерновых культур находятся в широких пределах ($\vartheta_{кр} = 5 \dots 20$ м/с).

Анализ математической зависимости (16) выявил прямую связь между скоростью воздушного потока и критической скоростью витания семян, одновременно показывая обратную зависимость от угла наклона транспортного канала относительно

горизонта.

Для эффективной подготовки всех видов зерновых культур к посеву на пневматической протравочной машине необходимо точно подобрать параметры воздушного потока, обеспечивающего надежную бесперебойную транспортировку семян. Оптимальный диапазон скоростей воздушного потока для этого процесса следует определить с помощью расчетов по уравнению (16), которые должны учитывать критические скорости семян, варьирующиеся от 5 до 20 м/с, при разных углах наклона транспортного канала.

При расчете рабочих углов наклона от 30° до 75° были учтены конструктивные параметры современных сепараторов, в которых традиционные механические загрузчики действуют в диапазоне 30°...60°. Графический анализ, выполненный с учетом габаритов оборудования и условий забора семян, выявил потенциал для увеличения угла действия пневмосистемы, устанавливаемой на бункере машины. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчётные значения скорости воздуха в пневмосемяпроводе
Table 2 – Calculated values of air velocity in a pneumatic seed duct

$\vartheta_{кр}, \text{ м/с}$	5				20			
$\alpha, ^\circ$	30	45	60	75	30	45	60	75
$\vartheta_{вп}, \text{ м/с}$	10	7,1	5,8	5,2	40	28,3	23,1	20,8

Анализ табличных данных показывает, что расчетные значения скорости воздушного потока варьируются от 5,2 до 40 м/с. Для выявления закономерностей

изменения скоростных показателей были составлены графические зависимости, отображающие данные, представленные на рисунке 3.

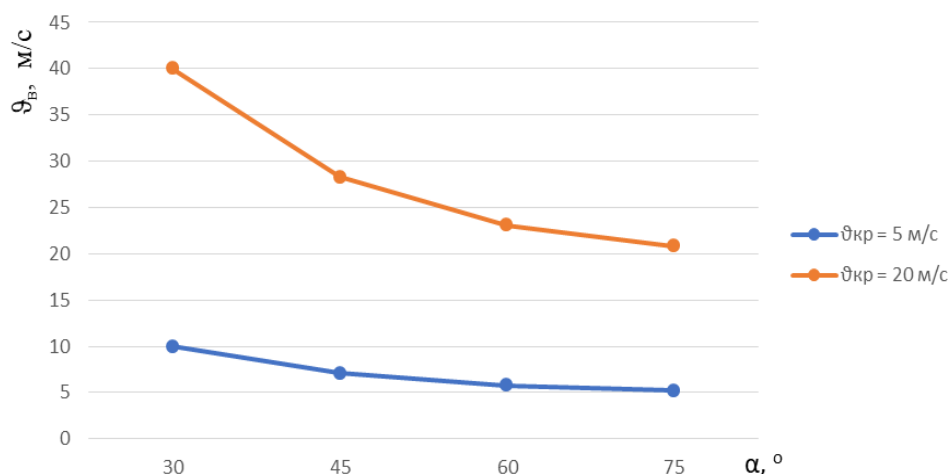


Рис. 3 – Графики изменения скорости воздуха в пневмосемяпроводе пневмозагрузочного устройства

Fig. 3 – Graphs of air velocity changes in the pneumatic loading device's pneumatic seed duct

Графические зависимости показывают устойчивую корреляцию между скоростью воздушного потока и оптимальным углом наклона пневмотранспортного канала, что является ключевым фактором для бесперебойной транспортировки разных видов семян.

Выявленная зависимость позволяет сделать вывод о том, что оптимальные скорости воздушного потока для перемещения семян основных зерновых культур при одинаковых углах наклона пневмосемяпровода лежат в диапазоне, находящемся между

значениями, представленными графическими зависимостями.

При разработке пневмозагрузочной системы необходимо учитывать, что сила воздушного потока создается вентилятором, и поэтому характеристики вентилятора должны быть подобраны с учетом максимальных расчетных значений скорости потока, соответствующих самым требовательным видам семян (см. верхний график). Такое решение обеспечивает эффективную транспортировку всех видов семян, даже тех, у которых низкие критические скорости витания, при сохранении тех же углов наклона транспортного канала. Чтобы минимизировать энергопотребление при обработке семян с низкими критическими скоростями, целесообразно оснастить систему регулируемым приводом вентилятора, что позволит настраивать его работу под каждую разновидность зерновых культур.

Анализ графических зависимостей показывает обратную пропорциональность между углом наклона транспортного канала и требуемой скоростью воздушного потока для эффективной транспортировки семян. Данная закономерность обосновывает техническую целесообразность максимально возможного увеличения угла установки пневмосемяпровода при проектировании конструкции, что позволит оптимизировать энергопотребление системы без ущерба для качества перемещения семенного материала.

Проведенные теоретические исследования позволили установить, что скорость перемещения семян в пневмотранспортном канале определяется критической скоростью витания частиц и углом наклона семяпровода по отношению к горизонтальной плоскости. Полученные результаты демонстрируют существенное влияние этих параметров на динамику движения зернового материала в условиях воздушного потока.

В результате проведенных исследований была выведена расчетная формула, которая определяет минимальную скорость воздушного потока, необходимую для поддержания семян в взвешенном состоянии внутри наклонного пневмотранспортного канала. Анализ полученной зависимости показывает обратную корреляцию между углом наклона семяпровода и требуемой интенсивностью воздушного потока - с увеличением угла отклонения от горизонтальной плоскости уменьшается необходимая скорость воздуха для обеспечения устойчивого взвешенного состояния частиц и предотвращения их осаждения.

На основании проведенных теоретических изысканий, посвященных определению оптимальных параметров воздушного потока в пневмотранспортной системе, получены практические рекомендации по подбору вентиляционного оборудования и определению

рационального угла монтажа на протравочном агрегате. Эти данные, учитывающие конструктивные особенности машины, позволяют обеспечить эффективное перемещение семенного материала во взвешенном состоянии по всему сечению транспортного канала без риска образования застойных зон и заторов.

Расход воздуха в пневмозагрузочном устройстве.

В пневмозагрузочном устройстве для генерации воздушного потока используется центробежный вентилятор. Для качественного перемещения заданного количества зерна генератор воздуха должен создать устойчивый поток определённого количества воздуха – расход воздуха. В нашем случае важно определение расхода воздуха необходимого для транспортировки семян с заданной концентрацией.

Расход воздуха в пневмосемяпроводе согласно уравнению неразрывности, определяется по зависимости:

$$Q_v = S_{nc} \vartheta_v, \quad (17)$$

где Q_v – расход воздуха в пневмосемяпроводе, м³/с; S_{nc} – площадь поперечного сечения рабочей полости пневмосемяпровода, м²; ϑ_v – скорость воздушного потока, м/с.

После подстановки в зависимость (17) формулу (16) и имея ввиду, что

$$S_{nc} = \frac{\pi d_{nc}^2}{4} = 0,8 d_{nc}^2$$

(где d_{nc} – диаметр рабочей полости пневмосемяпровода, м), получаем:

$$Q_v = 0,8 \frac{d_{nc}^2 \vartheta_{кр}}{\sin \alpha} \quad (18)$$

Выражение 18 позволяет определить минимальное количество воздуха, при котором семена будут перемещаться в воздушном потоке во взвешенном состоянии, т.е. позволяет рассчитать расход воздуха в пневмозагрузочном устройстве учитывая его диаметр и угол наклона пневмосемяпровода к горизонту, при обработке семян с разными скоростями витания.

Чтобы определить оптимальные конструктивные и технологические параметры пневмозагрузочного устройства, были проведены теоретические расчеты, целью которых было определение минимально необходимого количества воздуха, обеспечивающего надежную транспортировку семян в пневмозагрузочном устройстве. Расчёты выполнены для различных значений диаметра пневмосемяпровода с учётом результатов исследований, приведенных выше, т.е. при наибольших значениях скорости витания семян зерновых культур ($\vartheta_{кр} = 20$ м/с) и разных углах установки пневмосемяпровода относительно горизонтальной плоскости.

Результаты расчётов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчёта расхода воздуха
Table 3 – Results of air consumption calculation

$d_{пс}, \text{ м}$	Расход воздуха $Q_{в}, \text{ м}^3/\text{с}$		
	при $\alpha = 45^\circ$	при $\alpha = 60^\circ$	при $\alpha = 75^\circ$
0,05	0,08	0,06	0,05
0,1	0,23	0,19	0,17
0,15	0,49	0,42	0,37
0,2	0,76	0,66	0,58
0,25	0,99	0,86	0,76

На основе этих расчётов построены графические зависимости, наглядно показывающие изменение расхода воздуха, которые представлены на рисунке 4.

По графикам видно, что наблюдается очевидная закономерность увеличения расхода воздуха с увеличением диаметра рабочей полости пневмосемяпровода.

Полученные данные согласуются с теоретическими исследованиями изменений скорости воздушного потока в пневмосемяпроводе

(рис. 3), показывая, что увеличение угла наклона способствует снижению необходимой скорости и расхода воздуха для эффективной транспортировки семян. Это уменьшение положительно влияет на снижение энергозатрат всей системы пневмозагрузки и, следовательно, всей протравочной машины. Таким образом, при проектировании конструкции целесообразно стремиться к увеличению угла расположения пневмосемяпровода относительно горизонтальной плоскости.

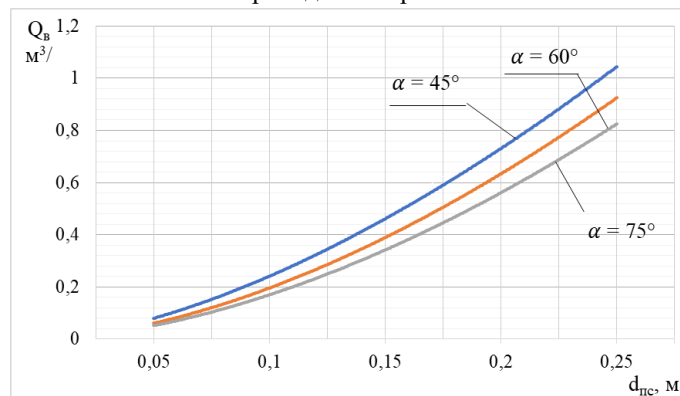


Рис. 4 – Графики изменения расхода воздуха в пневмозагрузочном устройстве в зависимости от диаметра рабочей полости пневмосемяпровода

Fig. 4 – Graphs of air consumption changes in the pneumatic loading device depending on the diameter of the working chamber of the pneumatic seed duct

Полученные графические зависимости являются основой для разработки номограммы по определению конструктивно-технологических параметров пневмозагрузочного устройства.

Таким образом, в результате математического моделирования движения воздушно-зерновой смеси получены численные значения скорости воздуха, обеспечивающие перемещение семян с различными аэродинамическими характеристиками при разных углах наклона пневмосемяпровода. Рассчитаны также значения расхода воздуха при разных диаметрах и углах наклона пневмосемяпровода.

Выводы. В результате математического моделирования воздушно-зерновой смеси в пневмозагрузочном устройстве пневматического типа для протравливателей семян зерновых культур семян получены новые теоретические зависимости, позволяющие определить основные параметры движения семян и воздуха в наклонном пневмосемяпроводе.

Исследования проводились для семян зерновых культур со скоростями витания 5–20 м/с при углах наклона пневмосемяпровода 30–75° и диаметрах 0,05–0,25 м.

Определено, что для семян с маленькой критической скоростью (5 м/с) при угле наклона пневмосемяпровода 30° минимальная скорость воздуха должна быть 10,0 м/с, при 45°–7,1 м/с, при 60°–5,8 м/с, при 75°–5,2 м/с, а для семян с максимальной критической скоростью (20 м/с) при 30°–40,0 м/с, при 45°–28,3 м/с, при 60°–23,1 м/с, при 75°–20,8 м/с.

Установлено, что для качественного перемещения семян с высокой критической скоростью (20 м/с) расход воздуха при увеличении диаметра от 0,05 м до 0,25 м при угле наклона пневмосемяпровода 45° возрастает от 0,08 до 0,99 м³/с, при 60° от 0,06 до 0,86 м³/с, при 75° от 0,05 до 0,76 м³/с.

Выведено уравнение движения семян, позволяющее теоретически описать траекторию зерна в пневмосемяпроводе разной длины и диаметра.

Полученные результаты в перспективе будут использованы для теоретического обоснования конструктивно-технологических параметров пневмосемяпровода, обеспечивающего качественное перемещение семян при требуемой пропускной способности и минимальной энергоёмкости.

Литература

1. Современное состояние зернового производства в Российской Федерации / Файзрахманов Д. И., Валиев А. Р., Зиганшин Б. Г. и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16. № 2(62). С. 138-142. doi:10.12737/2073-0462-2021-138-142.
2. Приоритетная технология создания новых высокоурожайных сортов яровой мягкой пшеницы на Среднем Урале / Н. Н. Зезин, В. А. Воробьев, А. В. Воробьев и др. // Зерновое хозяйство России. 2022. Т. 14. № 6. С. 59-63. – doi: 10.31367/2079-8725-2022-83-6-59-63.
3. Захаров В. Г., Мишенкина О. Г. Адаптивные свойства новых сортов овса в условиях Средневолжского региона // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 4(52). С. 100-107. doi: 10.18286/1816-4501-2020-4-100-107.
4. Зезин Н. Н., Митин А. Н. О необходимости ускорения внедрения современных технологий, влияющих на повышение эффективности сельскохозяйственного производства // Агропродовольственная политика России. 2024. № 5(112). С. 18-25. doi: 10.35524/2227-0280_2024_05_18.
5. Элементы структуры урожая и продуктивность зерна сортов ярового ячменя / Блохин В. И., Никифорова И. Ю., Ганиева И. С. и др. // Зернобобовые и крупяные культуры. 2023. № 4(48). С. 123-130. doi: 10.24412/2309-348X-2023-4-123-130.
6. Организация семеноводства сельскохозяйственных культур на орошении и техника полива / Валиев А. Р., Хисматуллин М. М., Сержанов И. М. и др. // Мелиорация и водное хозяйство. 2024. № 3. С. 7-15.
7. Физико-механические свойства зерна сортов ярового ячменя в условиях Татарстана / Блохин В. И., Никифорова И. Ю., Ганиева И. С. и др. // Зерновое хозяйство России. 2024. Т. 16. № 1. С. 19-25. doi: 10.31367/2079-8725-2024-90-1-19-25
8. Нуруллин Э. Г., Файзуллин Р. А. Экспериментальное исследование травмирования семян в сельскохозяйственных машинах // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17. № 2(66). С. 99-105. doi: 10.12737/2073-0462-2022-99-105.
9. Прогнозирование влияния физических факторов на жизнеспособность микроорганизмов биопрепаратов для защиты растений / Сабиров Р. Ф., Валиев А. Р., Сафин Р. И. и др. // Техника и оборудование для села. 2020. № 4(274). С. 29-33. doi: 10.33267/2072-9642-2020-4-29-32.
10. Influence of spring wheat seed treatment with low-temperature plasma on growth processes / Khuzina R. R., Nafikov M. M., Nafikov M. M. et al. // BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2024), Kazan, 28–29 ноября 2024 года. Kazan: EDP Sciences, 2025. P. 00060.
11. Оценка эффективности предпосевной обработки семян и посевов биологически активными веществами на яровой пшенице в условиях Предкамья Республики Татарстан / Амиров М. Ф., Сафиуллин А. Я., Гилязов М. Ю. и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18. № 2(70). С. 5-12. doi: 10.12737/2073-0462-2023-5-12.
12. Нуруллин Э. Г., Зайнутдинов И. Р., Файзуллин Р. А. Пневмозагрузочное устройство для мобильных протраивателей семян зерновых культур // Нива Поволжья. 2021. № 3(60). С. 142-151. doi: 10.36461/NP.2021.60.3.019.
13. Specifying Two-Phase Flow in Modeling Pneumatic Systems Performance of Farm Machines / Mudarisov S., Khasanov E., Rakhimov Z. et al. // Journal of Mechanical Engineering Research and Developments, 2017, vol. 40, № 4, p.706-715. doi: 10.7508/jmerd.2017.04.018.
14. Mathematical modeling of the grain material separation in the pneumatic system of the grain-cleaning machine / Badretdinov I., Mudarisov S., Tuktarov M. et al. // Journal of Applied Engineering Science, 2019, vol. 17, article 641, p. 529-534.
15. Ибятков Р. И., Зиганшин Б. Г. О моделировании случайных процессов в агропромышленном комплексе // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17. № 1(65). С. 50-55. – doi: 10.12737/2073-0462-2022-50-55.
16. Ибятков Р. И., Ахмадиев Ф. Г. Математическое моделирование течения двухфазных сред в сепараторах с криволинейными вставками // Теоретические основы химической технологии. 2023. Т. 57. № 4. С. 419-426. – doi: 10.31857/S0040357123040036.
17. Ибятков Р. И., Ахмадиев Ф. Г. Математическое моделирование течения неньютоновской двухфазной среды в канале сложной геометрической формы // Инженерно-физический журнал. 2024. Т. 97. № 5. С. 1231-1239.

References

1. Fayzrakhmanov DI, Valiev AR, Ziganshin BG. [Current state of grain production in the Russian Federation]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021; Vol.16. 2(62). 138-142 p. doi:10.12737/2073-0462-2021-138-142.
2. Zezin NN, Vorobev VA, Vorobev AV. [Priority technology for creating new high-yielding varieties of spring soft wheat in Middle Urals]. Zernovoe khozyaystvo Rossii. 2022; Vol.14. 6. 59-63 p. – doi: 10.31367/2079-8725-2022-83-6-59-63.
3. Zakharov VG, Mishenkina OG. [Adaptive properties of new oat varieties in the conditions of Middle Volga region]. Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2020; 4(52). 100-107 p. doi: 10.18286/1816-4501-2020-4-100-107.
4. Zezin NN, Mitin AN. [On the need to accelerate the implementation of modern technologies that affect the increase in the efficiency of agricultural production]. Agroprodovolstvennaya politika Rossii. 2024; 5(112). 18-25 p. doi: 10.35524/2227-0280_2024_05_18.
5. Blokhin VI, Nikiforova IYu, Ganieva IS. [Elements of crop structure and grain productivity of spring barley varieties]. Zernobobovye i krupyanye kultury. 2023; 4(48). 123-130 p. doi: 10.24412/2309-348X-2023-4-123-130.
6. Valiev AR, Khismatullin MM, Serzhanov IM. [Organization of seed production of agricultural crops on irrigation and watering technology]. Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo. 2024; 3. 7-15 p.
7. Blokhin VI, Nikiforova IYu, Ganieva IS. [Physical and mechanical properties of spring barley grain varieties in the conditions of Tatarstan]. Zernovoe khozyaystvo Rossii. 2024; Vol.16. 1. 19-25 p. doi: 10.31367/2079-8725-2024-90-1-19-25

8. Nurullin EG, Fayzullin RA. [Experimental study of seed injury in agricultural machinery]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022; Vol.17. 2(66). 99-105 p. doi: 10.12737/2073-0462-2022-99-105.
9. Sabirov RF, Valiev AR, Safin RI. [Forecasting the influence of physical factors on the viability of microorganisms of biological products for plant protection]. Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2020; 4(274). 29-33 p. doi: 10.33267/2072-9642-2020-4-29-32.
10. Khuzina RR, Nafikov MM, Nafikov MM. Influence of spring wheat seed treatment with low-temperature plasma on growth processes. BIO Web of Conferences: International Scientific and Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2024), Kazan, 28-29 noyabrya 2024 goda. Kazan: EDP Sciences. 2025; 00060 p.
11. Amirov MF, Safiullin AY, Gilyazov MYu. [Evaluation of the efficiency of pre-sowing treatment of seeds and crops with biologically active substances on spring wheat in the conditions of Kama region of the Republic of Tatarstan]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2023; Vol.18. 2(70). 5-12 p. doi: 10.12737/2073-0462-2023-5-12.
12. Nurullin EG, Zaynutdinov IR, Fayzullin RA. [Pneumatic loading device for mobile seed treaters of grain crops]. Niva Povolzhya. 2021; 3(60). 142-151 p. doi: 10.36461/NP.2021.60.3.019.
13. Mudarisov S, Khasanov E, Rakhimov Z. Specifying two-phase flow in modeling pneumatic systems performance of farm machines. Journal of Mechanical Engineering Research and Developments. 2017; Vol.40. 4. 706-715 p. doi: 10.7508/jmerd.2017.04.018.
14. Badretdinov I, Mudarisov S, Tuktarov M. Mathematical modeling of the grain material separation in the pneumatic system of the grain-cleaning machine. Journal of Applied Engineering Science. 2019; Vol.17. article 641. 529-534 p.
15. Ibyatov RI, Ziganshin BG. [On modeling random processes in the agro-industrial complex]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2022; Vol.17. 1(65). 50-55 p. – doi: 10.12737/2073-0462-2022-50-55.
16. Ibyatov RI, Akhmadiev FG. [Mathematical modeling of two-phase media flow in separators with curved inserts]. Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii. 2023; Vol.57. 4. 419-426 p. – doi: 10.31857/S0040357123040036.
17. Ibyatov RI, Akhmadiev FG. [Mathematical modeling of the flow of a non-Newtonian two-phase medium in a channel of complex geometric shape]. Inzhenerno-fizicheskii zhurnal. 2024; Vol.97. 5. 1231-1239 p.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Нуруллин Эльмас Габбасович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машин и оборудования в агробизнесе Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), e-mail: nureg@mail.ru, ORCID 0000-0002-8074-6050

Файзуллин Ренат Айратович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры машин и оборудования в агробизнесе Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), e-mail: fayzullinrenat@mail.ru, ORCID 0009-0005-8510-8639

Фасхiev Равиль Фаилевич – инженер Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), e-mail: faskhiev98.98@gmail.com, ORCID 0009-0009-1842-8906

Вклад авторов:

Э.Г. Нуруллин – руководство, концептуализация, методология, разработка математических моделей, написание – рецензирование и редактирование;

Р.А. Файзуллин – аналитические исследования, разработка математических моделей, написание – подготовка первоначального варианта, проверка расчётов и графиков, работа с литературой;

Р.Ф. Фасхiev – анализ литературы, разработка математических моделей, выполнение расчётов и их визуализация (составление графиков).

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 26.05.2025; одобрена после рецензирования 22.02.2026; принята к публикации 01.04.2026.

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

Authors:

Nurullin Elmas Gabbasovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Machinery and Equipment in Agribusiness Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: nureg@mail.ru, ORCID 0000-0002-8074-6050

Fayzullin Renat Ayratovich – Ph.D. of Technical Sciences, senior lecturer of Department of Machinery and Equipment in Agribusiness Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: fayzullinrenat@mail.ru, ORCID 0009-0005-8510-8639

Faskhiev Ravil Failevich – an engineer Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: faskhiev98.98@gmail.com, ORCID 0009-0009-1842-8906

Contribution of the authors:

E.G. Nurullin – Supervision, Conceptualization, Methodology, Development of mathematical models, Writing – review and editing;

R.A. Fayzullin – Analytical research, Development of mathematical models, Writing – original draft preparation, Verification of calculations and graphs, Literature review;

R.F. Faskhiev – Literature review, Development of mathematical models, Performing calculations and their visualization (graph preparation).

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 26.05.2025; revised 22.02.2026; accepted 01.04.2026.



**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЦЕПЛЕНИЯ
ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ В УСЛОВИЯХ АБРАЗИВНОГО
ИЗНАШИВАНИЯ**

© 2026 Попов А. М., Плотников К. Б., Мехдиев Р. В., Майтаков А. Л. ✉, Ветрова Н. Т.

*Кемеровский государственный университет
(г. Кемерово, Российская Федерация)
✉ may585417@mail.ru*

Реферат. Детальными, лимитирующими долговечность зубчатых передач, трансмиссий сельскохозяйственной техники являются шестерни, подверженные интенсивному абразивному изнашиванию так как их эксплуатация происходит в условиях высокой запыленности воздуха из-за недостаточной герметичности внутренних полостей. Цель исследований – изучение и анализ изменений характеристик зацеплений и их влияние на кинематику высоконагруженных зубчатых передач в условиях абразивного изнашивания. Исследования проводились с помощью метода слепков для фиксации относительного положения профилей. Одновременно проводилось тензометрирование для установления начала и конца зацепления пары зубьев и установления коэффициента перекрытия. Углы поворота фиксировались оптическими делительными головками. Испытывались прямозубые передачи с модулями $m=2-5$ мм без смещения исходного контура (термообработка - нормализация и объёмная закалка HRC38-400; числа зубьев шестерни $z_1=12-30$, $z_2=22-90$. Материал шестерни - сталь 40X, колеса – сталь 45. Установлено, что при абразивном изнашивании высоконагруженных передач форма профиля зубьев изменяется, главным образом, в начальный период износа при его величине 5-8%. Размах колебаний при изнашивании возрастает, особенно в начальный период. По мере увеличения износа рост размаха колебаний замедляется и при износе зубьев шестерни свыше 12-16% размах стабилизируется. Рост размаха колебаний с увеличением модуля e возрастает. Колебания при изнашивании могут достигать значительной величины: при износе 16% и более при малом числе зубьев шестерни увеличение размаха достигало 130%. Установлено, что линия зацепления при изнашивании искривляется. Начало и конец зацепления сдвигаются по ходу вращения зубчатых колес. Коэффициент перекрытия по мере износа уменьшается и при износе свыше 10-14% стабилизируется в пределах 1,03-1,1. Создана математическая модель функции передаточного отношения в зависимости от величины износа.

Ключевые слова: зубчатые передачи, износ, вибрация, сельскохозяйственные машины, тензометрический способ.

Для цитирования: Исследование изменения характеристик зацепления высоконагруженных зубчатых передач в условиях абразивного изнашивания / А.М. Попов, К.Б. Плотников, Р.В. Мехдиев и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 89-98. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-89-98

**INVESTIGATION OF CHANGES IN THE GEARING CHARACTERISTICS OF HIGHLY
LOADED DRIVES IN CONDITIONS OF ABRASIVE WEAR**

© 2026 Popov A. M., Plotnikov K. B., Mekhdiiev R. V., Maytakov A. L. ✉, Vetrova N. T.

*Kemerovo State University
(Kemerovo, Russian Federation)
✉ may585417@mail.ru*

Abstract. Gears, which are subject to intense abrasive wear due to their operation in dusty environments due to insufficient sealing of internal cavities, limit the service life of gear drives and transmissions in agricultural machinery. The aim of this study was to investigate and analyze changes in engagement characteristics and their impact on the kinematics of heavily loaded gear drives in conditions of abrasive wear. The study was conducted using a casting method to record the relative positions of profiles. Simultaneously, strain gauge measurements were performed to determine the start and end of engagement of a pair of teeth and to establish the overlap coefficient. Rotation angles were recorded using optical dividing heads. Spur gears with modules $m=2-5$ mm were tested without shifting the original contour (heat treatment - normalization and bulk hardening HRC38-400; the number of gear teeth $z_1=12-30$, $z_2=22-90$. Gear material - steel 40X, wheel - steel 45. It was found that during abrasive wear of highly loaded gears, the shape of the tooth profile changes mainly in the initial period of wear when its value is 5-8%. The amplitude of oscillations during wear increases, especially in the initial period. As wear increases, the increase in the amplitude of oscillations slows down and when the wear of gear teeth is over 12-16%, the amplitude stabilizes. The increase in amplitude of oscillations with an increase in modulus e increases. Oscillations during wear can reach a significant value: at wear of 16% or more

with a small number of gear teeth, the increase in amplitude reached 130%. It was found that the engagement line of the gear becomes distorted with wear. The start and end points of engagement shift along the direction of rotation of the gears. The overlap ratio decreases with wear and, at wear levels exceeding 10-14%, stabilizes within the range of 1.03-1.1. A mathematical model of the gear ratio function depending on the degree of wear has been developed.

Key words: gears, wear, vibration, agricultural machinery, strain gauge method.

For citation: Popov AM, Plotnikov KB, Mekhdiy RV, et al. [Investigation of changes in the gearing characteristics of highly loaded drives in conditions of abrasive wear]. Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2026; Vol. 21. 1(81). 89-98 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-89-98

Введение. Современный агропромышленный комплекс характеризуется широким применением машин, механизмов, агротехнических комплексов, позволяющих в значительной степени повысить степень механизации и автоматизации производства, и как следствие, производительность сельскохозяйственного производства. При их эксплуатации интенсивному износу подвергаются зубчатые колеса коробок перемены передач (КПП), раздаточных механизмов, бортовых редукторов и т.п. [1, 2]. Например, по данным ремонтного предприятия сельхозтехники «ДорАвтоСервис» (г. Кемерово) у колес КПП тракторов МТЗ зафиксированные износы по толщине зубьев составляют у шестерни $z=27$ МТЗ-1025 – 0,43 мм, а у колес цилиндрической передачи редукторов для комбайнов «Акрос-580 ($z=26$, $m=5$ мм) – 0,75-1,2 мм.

Абразивный износ является основной причиной выхода из строя передач сельскохозяйственных, подъемно-транспортных и горных машин. К таким передачам относятся, прежде всего, открытые передачи, а также закрытые, но недостаточно защищенные от загрязнения абразивными частицами (пыль, продукты износа) [3]. У изношенной передачи увеличиваются зазоры в зацеплении, возникают вибрации, возрастают динамические нагрузки, шумы, сокращается долговечность приводов [4]. Снижается прочность изношенного зуба вследствие уменьшения площади его поперечного сечения. Все это может привести к поломке зубьев [1, 5]. Расчет на износ затруднен тем, что интенсивность износа зависит от многих случайных факторов, в первую очередь от интенсивности загрязнения смазки. На практике при расчете передач, у которых наблюдается износ зубьев, понижают допускаемые контактные напряжения до значений, установленных на основе опыта эксплуатации подобных конструкций [6]. Как показывают исследования академика Крагельского [3] скорость изнашивания двух подвижных кинематических пар зависит от твердости и кривизны сопрягаемых поверхностей, размера и прочности абразивных частиц, а также от скорости скольжения. Наиболее рациональным способом повышения ресурса зубчатых передач коробок скоростей тракторов и редукторов является уменьшение скорости изнашивания зубьев колес. Такого эффекта можно добиться оптимизацией эксплуатационных, технологических и конструктивных параметров. Что касается прогнозирования остаточного ресурса

таких сопряжений, то в них из-за износа зубьев изменяющимся параметром являются как раз приведённый радиус кривизны и скорость скольжения.

Создание расчетных методов прогнозирования и способов повышения долговечности узлов трения представляется весьма актуальной задачей, тем более что здесь практически отсутствуют справочные рекомендации. В общем случае ресурс узлов трения по износу по Крагельскому [3, 7] определяется из соотношения (1):

$$T = [h]/V_1 \quad (1)$$

где $[h]$ – допустимый износ поверхностей, V_1 – скорость изнашивания мкм/час.

Скорость изнашивания согласно [3] определяется из зависимости:

$$V_1 = 576 \frac{\varepsilon^2 \cdot \beta^{0.5} \cdot \sigma^{2.5}}{HB_1^{1.5} \cdot HB_2 \cdot \delta_1} \sqrt{\rho_{пр}} \cdot \eta_1 \cdot n_1 \quad (2)$$

где V_1 – скорость изнашивания зубьев шестерни и колеса по диаметру начальной окружности, мкм/час; σ – условное напряжение сжатия абразивной частицы, кг/мм²; β – средний объёмный радиус частицы, мм; ε – объёмная концентрация абразивных частиц, %; δ_1 – относительная удлинение при разрыве материала зубьев, %; HB_1 , HB_2 – твердость зубьев шестерни и колеса по Брунеллю, кг/мм²; n_1 , n_2 – частота вращения шестерни и колес, об/с; η_1 – удельное скольжение на шестерне; $\rho_{пр}$ – приведённый радиус кривизны зубьев.

Диагностика зубчатых передач в течение всего периода их эксплуатации имеет большое значение, как на стадии их технического обслуживания и ремонта, с целью оценки ресурса их дальнейшей работы, так и для практики проектирования зубчатых зацеплений [6, 7]. Существующие методики определения интенсивности изнашивания либо совсем не учитывают изменения параметров зацепления при изнашивании [1, 8, 9], либо учитывают их при постоянстве функции передаточного отношения в процессе изнашивания, либо с учетом всех этих параметров, но при малой величине износа [10]. Уточнение изменения их в процессе изнашивания позволит с большей точностью прогнозировать ресурс и совершенствовать методы диагностики передач сельхозмашин, что напрямую влияет на снижение эксплуатационных затрат.

Цель исследований – изучение и анализ

изменений характеристик зацеплений и их влияние на кинематику высоконагруженных зубчатых передач в условиях абразивного изнашивания.

Условия, материалы и методы. Решение данной задачи включало не только установление величины износа, но и исследование изменения формы профиля зуба и связанных с ней геометрических параметров зацепления в процессе изнашивания. Поэтому на каждом этапе износа требовалось фиксировать форму изношенного профиля. Следовательно, в нашем случае требовалось измерение линейного (а не интегрального) износа зубьев в различных их сечениях [4]. Кроме того, необходимо было зафиксировать для построения линии зацепления положение точки контакта профилей в их взаимном расположении поэтапно за период зацепления пары зубьев.

Как показывают работы ряда авторов при исследовании формы профиля зуба и связанных с ней геометрических параметров зацепления в процессе изнашивания, наиболее подходящим является метод слепков с последующим их увеличением. При этом методе не требуется разборки редуктора, а он обладает достаточно высокой точностью; так по данным работы [5, 9] точность замера износа зубьев этим методом составляет 0,005...0,008 мм. Слепок используется как для оценки профиля изношенного зуба, так и оценки расположения зубьев шестерни и

колеса относительно друг друга и относительно линии, соединяющей центры колес, что позволяет фиксировать положение точки контакта пары.

Для изготовления слепков был использован протакрил – пластмасса холодной полимеризации. Профили слепков фотографировались в нескольких проекциях и далее «обрабатывались» в одном масштабе использованием программного обеспечения Matlab, обработка бинарных изображений. Все профили со слепков, полученных на разных этапах износа одной и той же пары зубьев, снимались без разборки редукторов.

На профилях слепков измеряли абсолютный износ по всему профилю зуба, а также отдельно фиксировался износ по начальной окружности ΔS_{abc} . Отношение значения износа ΔS_{abc} к первоначальной толщине зуба S_w по той же окружности даёт нам величину относительного износа (3):

$$\Delta S = \frac{\Delta S_{abc}}{S_w} \cdot 100\% \quad (3)$$

Износ оценивался по изменению толщин зуба, измеренных в 10 точках профиля от ножки до головки зуба. Результаты стендовых испытаний показали (рис. 1), что на профиле зуба шестерни в процессе изнашивания образуется выемка, а на сопряженном зубе колеса – выступ. Повышенный износ наблюдался также и на головке зуба.

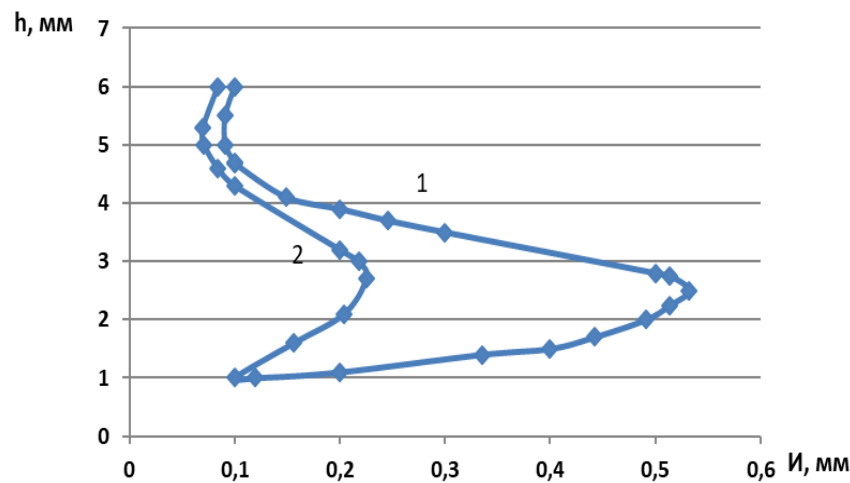


Рис. 1 – Кривые износа шестерен по профилю, ($m=4$ мм, $\frac{z_1}{z_2} = \frac{18}{42}$): 1 – кривая износа шестерни; 2 – кривая износа колеса; h – высота зуба, мм; I – износ, мм

Fig. 1 – Gear wear curves along the profile ($m=4$ mm, $\frac{z_1}{z_2} = \frac{18}{42}$): 1 – gear wear curve; 2 – wheel wear curve; h – tooth height, mm; I – wear, mm.

Функция передаточного отношения определяет отношение мгновенных угловых скоростей колёс в зависимости от угла ведущего колеса (4):

$$i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{d\varphi_1}{d\varphi_2} = f(\varphi_1) \quad (4)$$

Значение мгновенного передаточного

отношения, в функции передаточного отношения за период зацепления пары зубьев определялось, исходя из опытов по определению избыточных перемещения колеса, проводимых при медленном проворачивании шестерни на угол φ_1 , с фиксацией на делительных головках ОДГ10 и ОДГ60 φ_2 , нагруженных статическим

рабочим моментом, определяемым, как предельный из условия контактной прочности по ГОСТ 23.205-79. Оценка величины нагрузок на зуб, момента начала контакта и его

окончания определялся тензометрированием и визуально с видео-фиксацией. Расположение тензодатчиков 1, 2, 3 и 4 на зубе и схема измерения показаны на рис. 2.

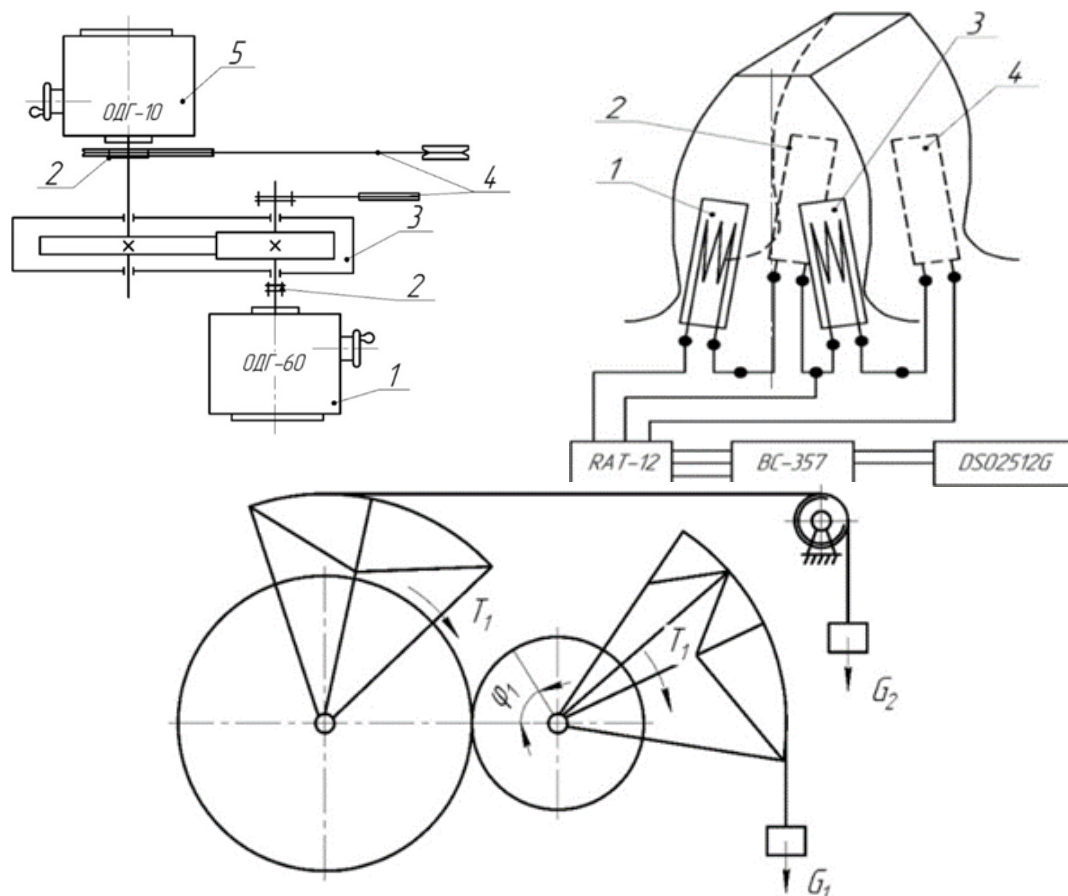


Рис. 2 – Схема наклейки тензодатчиков и установки для комплексной однопрофильной проверки зацепления: RAT-12 - токосъемник; BC-339 - тензометрический усилитель; DS02512G - шлейфовый осциллограф; 1 и 5 – оптические делительные головки;

2 - жесткая муфта, 3 – редуктор, 4 – нагрузчики с моментами T_1 и T_2

Fig. 2 – Diagram of strain gauge attachment and setup for comprehensive single-profile gear mesh testing: RAT-12 – current collector; BC-339 – strain gauge amplifier; DS02512G – strip-chart (or pen) oscilloscope; 1 and 5 – optical dividing heads; 2 – rigid coupling; 3 – gearbox (reducer); 4 – loaders with torques T_1 and T_2

Измерительная схема включает в себя: выносной полумост из тензодатчиков, установленные для повышения чувствительности с двух торцов зуба, и соединенные между собой последовательно (первый со вторым и третий с четвертым).

Были использованы тензодатчики BF100 с базой 5 мм, омическим сопротивлением $R = 100$ Ом. Датчики наклеивались на торцах зубьев ведомого колеса вблизи галтелей под углом 10° к радиусу, проведенному через середину зуба.

Для предохранения датчиков от разрушения при износе, они монтировались на расстоянии 2 - 3 мм от кромки зуба. Для определения начала и конца зацепления пары соседних зубьев и наблюдения картины распределения нагрузки за период их зацепления использовались тензодатчики. Испытания проводилась на специально сконструированной установке

(рис. 2) на разных периодах износа.

Оценка изменения кинематической точности зацепления, с одновременным замером силового взаимодействия зубьев, осуществлялась без разборки редуктора (снималась только крышка смотрового окна сверху). Установке (рис. 2) состоит из редуктора и 2-х оптических делительных головок: ОДГ-10, присоединенной к валу шестерни и ОДГ-60, присоединенной к валу колеса. Зацепление нагружается моментами T_1 и T_2 – через рычаги грузами G_1 и G_2 , обеспечивающими рабочие усилия в зацеплении. Через фиксированный угол поворота шестерни фиксируется соответствующий повороту шестерни – угол поворота колеса и соответствующее значение усилия в зацеплении, снятое с тензодатчиков (рис. 2).

Очевидно, при съеме усилий с датчиков

нельзя исключить двухпарное зацепление. Поэтому для учета этого влияния, а также для экспериментального определения коэффициента перекрытия, регистрировались одновременно напряжения с трех смежных зубьев. При тарировке легко улавливаются характерные точки пересопределения.

При этом для каждого фиксированного положения колес снимались слепки, фиксирующие взаимное положение контактирующих зубьев. фотографии слепков, увеличенные в 20 раз, позволяли с помощью не сложных построений зацепления пары зубьев, определить положение точки контакта. Последовательное построение положения точек контакта от начала зацепления до выхода зуба из зацепления дают нам, согласно теории, линию зацепления.

Выбор масла для смазки зубчатых колес при проведении испытания основывался на определении требуемой вязкости смазки в зависимости от окружной скорости и прочности материала по общепринятым данным [10]. При проведении исследований для смазки зубчатых колес использовалось масло редукторное минеральное Gazpromneft CLP-220.

Зубчатые передачи сельскохозяйственных транспортных, дорожных и других машин работают в условиях абразивной среды, и абразивный износ является преобладающим видом их разрушения. При этом, основной составной частью, определяющей абразивность среды [2, 3], является кремнезём SiO_2 . Поэтому опыты по абразивному изнашиванию

нами велись на его пыли с размером зёрен в пределах 0,08 - 0,14 мм.

Согласно литературным данным содержание частиц в смазке сельскохозяйственных и горных машин составляет не более 3-4% по массе [7], поэтому в экспериментах зубчатые колёса испытывались на смазке, содержащей 4% абразивной пыли. Через каждые 12 часов работы смазка и абразивная составляющая заменялись.

Подшипники редукторов установки были защищены от попадания в них смазки из корпуса редуктора и смазывались консистентной смазкой.

Задачей нашей работы являлась экспериментальное и аналитическое исследование влияния величины износа зубьев цилиндрических прямозубых передач различного модуля на изменение параметров зацепления при заданных критериях износа. Такими критериями являлись удельное скольжение и кривизна профилей зубьев.

Наиболее полно и наглядно данные параметры характеризуются линией зацепления и функцией передаточного отношения.

Важной характеристикой передачи является также коэффициент перекрытия. Кроме того, он позволяет дополнительно экспериментально контролировать правильность построения линии зацепления [4]. Испытания проводились на колесах разных модулей, с коэффициентом смещения исходного контура и без смещения, различной твердости (табл. 1).

Таблица 1 – Основные характеристики испытываемых колес
Table 1 — Main characteristics of the test gears

№ пары	m (мм)	z_1	z_2	x_1	x_2	Твердость зубьев шестерни	Твердость зубьев колеса	Термообработка
1	2	30	90	0	0	HB 230 - 240	HB 200 - 210	нормализация
2	2,5	24	72	0	0	HB 230 - 240	HB 200 - 210	нормализация
3	3	20	60	0	0	HB 230 - 40	HB 200 - 210	нормализация
4	4	15	45	0	0	HB 230 - 240	HB 200 - 210	нормализация
5	5	12	36	0	0	HB 230 - 240	HB 200 - 210	нормализация
6	5	12	36	+0,3	-0,3	HB 230 - 240	HB 200 - 210	нормализация
7	4	18	42	0	0	HB 230 - 240	HB 200 - 210	нормализация
8	4	18	42	0	0	HRC 45	HRC 38	объемная закалка
9	6	18	22	0	0	HRC 45	HRC 38	объемная закалка
10	6	18	22	0	0	HB 230 - 240	HB 200 - 210	нормализация
11	3	20	60	0	0	HRC 45	HRC 38	объемная закалка
12	5	12	36	+0,3	-0,3	HRC 45	HRC 38	объемная закалка
13	5	18	30	0	0	HB 230 - 240	HB 200 - 210	нормализация

Испытывались передачи, с нагрузкой предельной по условию контактной прочности, в установке замкнутым потоком мощности, с частотой $n_1=24,3 \text{ с}^{-1}$. Материал шестерни – сталь 40Х, колеса – сталь 45.

Тарировка датчиков на величину напряжений не нужна, т.к. они в статике при рабочей нагрузке, показывают только характер перераспределения нагрузки.

Все эксперименты повторялись по 5 раз. Далее проверка производилась проверка по критериям Кохрена, Стьюдента и Фишера (при критерии вероятности 95%)

Результаты и обсуждение. На рисунке 3 приведены данные, полученные в результате проведения экспериментов. Точки, приведенные на графиках – средние значения из 5 измерений (без указания доверительных интервалов).

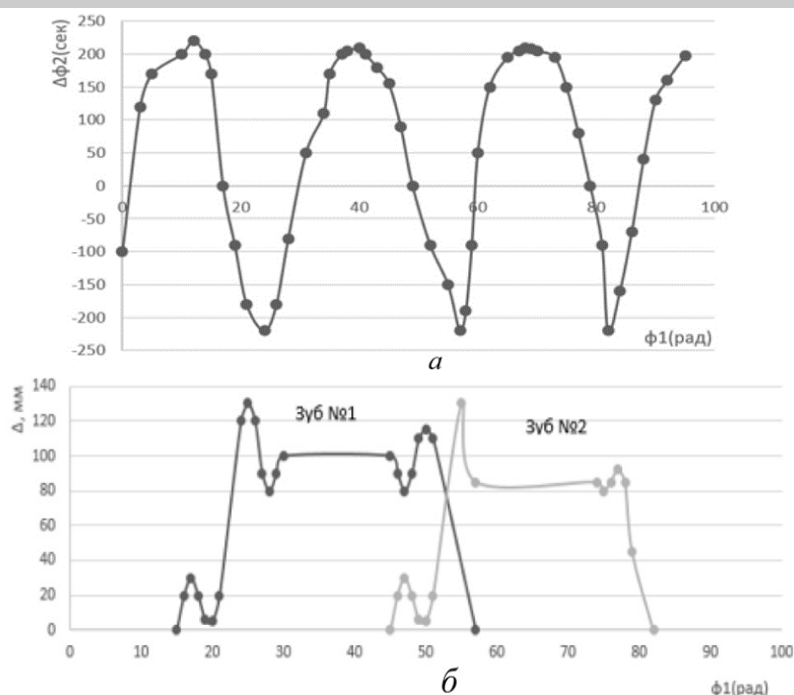


Рис. 3 – Результаты статического испытания передач с $m=5$ мм при износе $\Delta S=4\%$: а - кривые избыточных перемещений -показания с делительных головок , б - кривые нагружения соседних зубьев с рабочей нагрузкой с тензодатчиков

Fig. 3 — Results of static testing of transmissions with $m=5$ mm at wear $\Delta S=4\%$: a — excess displacement curves — readings from dividing heads; b — loading curves of adjacent teeth under working load from strain gauges

Как видно графики избыточных перемещений (циклическая погрешность) носят гармонический характер с периодом, равным

периоду зубцовой частоты. Результаты замеров для все испытываемых пар, на всех стадиях износа, приведены на рис. 4.

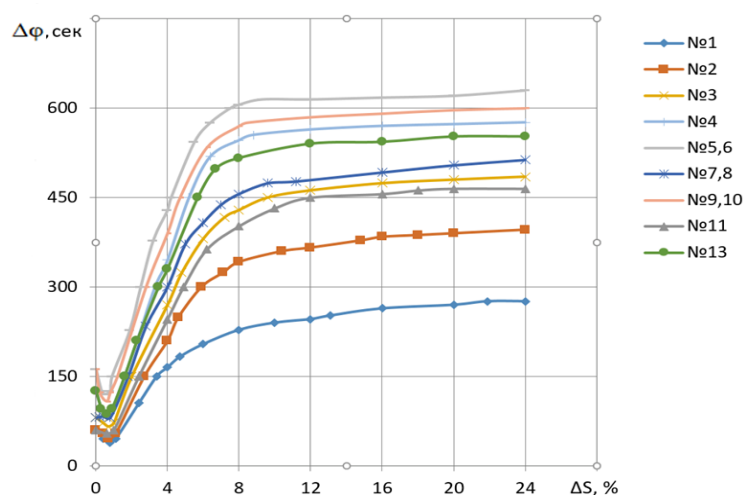


Рис. 4 – Кривые изменения избыточных перемещений зубцовой частоты при абразивном изнашивании (№ пар из табл. 1)

Fig. 4 — Curves of changes in excess displacements of the tooth frequency during abrasive wear (gear pairs No. from Table 1)

Из осциллограмм силового взаимодействия зубьев видно, что при малой (менее 1%) величине износа значение коэффициента перекрытия совпадает с расчетным значением для неизношенных зубьев, за исключением появившихся всплесков, характеризующих период входа зуба в зацепление. Из графиков нагрузки можно заключить, что в мало изношенном

зацеплении, несмотря на кажущуюся возможность приработки, усилия передаётся практически одной парой зубьев (рис. 3, $\Delta S=4\%$, б - $\phi_1=45-56^\circ$). При износе $\Delta S=8\%$ эти же характеристики будут - $\phi_1=54-56^\circ$; угол перекрытия - 2° . Анализ изменения коэффициентов перекрытия при износе для всех испытываемых пар на разных стадиях износа, по характеру

силового пересопряжения соседних зубьев показал, что для всех передач различного модуля и, соответственно, различного числа зубьев, с разным передаточным числом и с разной твёрдостью, коэффициент перекрытия при износе свыше 8-12% составляет приблизительно 1,0.

Рассмотрение графиков изменения функции передаточного отношения для всех испытуемых пар (табл. 1) показало, что уже при небольшом износе (2-3%) на линии зацепления заметно появление обратного контакта головки зуба шестерни с ножкой зуба колеса в конце линии зацепления (рис. 5), т.е. дополнительный участок контакта головки зуба шестерни и ножки зуба колеса приводит к увеличению износа. При этом изменяется в обратную сторону направление вектора скорости скольжения.

Дальнейший анализ функции передаточного отношения при изнашивании с целью получения её зависимости от величины износа и модуля удобнее вести с использованием крайних положений мгновенных полюсов на линии центров колёс (рис. 5). Расстояние от положения полюса P_0 , определяемого передаточным числом зубчатой пары, до крайнего положения мгновенного полюса при износе выше $\Delta S = 25\%$ при максимально достижимой величины износа (33%) составляет не более 0,9 модуля. Тогда для передач, выполненных без смещения исходного контура, предельное расстояние от центра шестерни до этой крайней точки, можно принять:

$$r_H = r_{w1} - 0,9m \quad (5)$$

где $r_{w1} = \frac{z_1 \cdot m}{2}$; m – модуль зацепления.

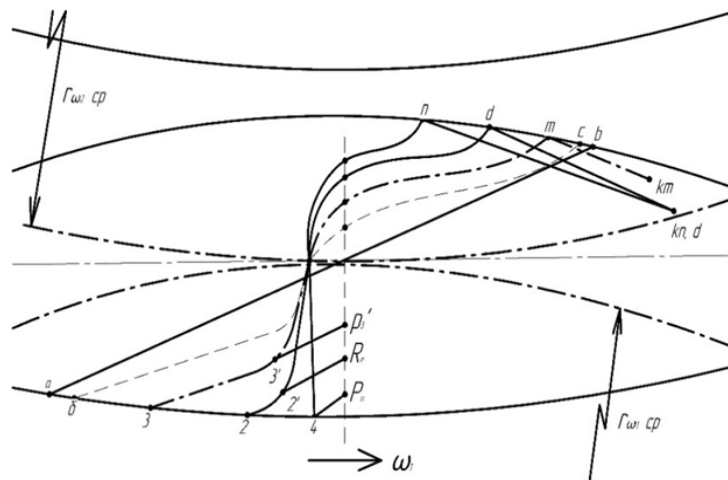


Рис. 5 - Изменение линии зацепления при изнашивании

$$(\Delta S = 0; 3; 5; 8; 25; m = 5 \text{ мм}; \frac{z_1}{z_2} = \frac{18}{30})$$

a, b, 3, 2, 4 – точки начала зацепления; kb, kc, km, kn, c – точки конца зацепления;
n, d, m, c - точки начала обратного контакта

Fig. 5 — Changes in the line of action during wear

$$(\Delta S = 0; 3; 5; 8; 25; m = 5 \text{ мм}; \frac{z_1}{z_2} = \frac{18}{30})$$

a, b, 3, 2, 4 — points of the start of engagement; kb, kc, km, kn, c —
points of the end of engagement; n, d, m, c — points of the start of reverse contact

Расстояние от P_0 до второго крайнего положения мгновенного полюса составляло не более 0,65 модуля. Следовательно, для не скорректированной передачи расстояние от этой точки до центра шестерни можно считать равным:

$$r_B = r_{w1} + 0,65m \quad (6)$$

Исходя из сказанного, определяем экстремальные значения функции передаточного отношения, используя основную теорему зацепления [1]:

$$i_{12}^{\max} = \frac{r_{w2}^{\max}}{r_{w1}^{\min}} = \frac{r_{w2} + 0,9m}{r_{w1} - 0,9m} = \frac{z_2 + 1,8}{z_1 - 1,8} \quad (7)$$

$$i_{12}^{\max} = \frac{r_{w2}^{\min}}{r_{w1}^{\max}} = \frac{r_{w2} - 0,65m}{r_{w1} + 0,65m} = \frac{z_2 - 1,3}{z_1 + 1,3} \quad (8)$$

где: $r_{w2} = 0,5mz_2$:

$r_{w1}^{\min}, r_{w1}^{\max}, r_{w2}^{\max}, r_{w2}^{\min}$ – минимальные и

максимальные значения мгновенных радиусов центров вращения шестерни и колеса.

Так как крайнее положение полюса является функцией не только модуля, но и величины износа, то в зависимостях 4 и 5 вводим коэффициент, учитывающий степень изношенности передачи $k_{\Delta S}$. Учитывая, что $k_{\Delta S}$ скажется не на r_{w1} , r_{w2} , а на расстоянии крайних положений мгновенного полюса от P_0 , уравнения 4 и 5 для разных величин износа представим в виде:

$$i_{12}^{\max} = \frac{z_2 + 1,8 \cdot k_{\Delta S}}{z_1 - 1,8 \cdot k_{\Delta S}} \quad (9)$$

$$i_{12}^{max} = \frac{z_2 - 1.3 \cdot k_{\Delta S}}{z_1 + 1.3 \cdot k_{\Delta S}} \quad (10)$$

Как показывает анализ полученных зависимостей, выражающих функцию передаточного отношения, значение степени изношенности передачи может быть выражено корреляционной зависимостью:

$$K_{\Delta S} = \frac{1,1^{\Delta S} - 1,1^{-\Delta S}}{1,1^{\Delta S} + 1,1^{-\Delta S}} \quad (11)$$

где ΔS - относительная величина износа, %.

Из графиков (рис. 4) видно, что функция передаточного отношения изношенного зацепления является периодической. Кроме того, характер кривых, выражающих функцию передаточного отношения для разных модулей и величин износа, как видим - одинаков. Поэтому единичную функцию передаточного отношения с размахом колебания равным двум, относительно среднего её значения a_0 , и представим в виде соответствующего ряда Фурье:

$$i_{12}^1 = a_0 + \sum_{n=1}^n (a_n \cdot \cos n z_1 \varphi_1 + b_n \cdot \sin n z_1 \varphi_1) \quad (12)$$

или в более удобном для использования виде:

$$i_{12}^1 = a_0 + \sum_{n=1}^n b_n \cdot \sin (n z_1 \varphi_1 + \psi_n) \quad (13)$$

где a_0 - постоянная ряда; a_n - косинусный коэффициент n -й гармоник; b_n - синусный коэффициент n -й гармоники; ψ_n - фазовый угол n -й гармоники; n - порядковый номер гармоники.

Для анализа выбирался участок длиной в один период первой гармонической составляющей, соответствующий периоду зубцовой частоты. Затем период зубцовой частоты делился на 24 равных части, соответственно применяемому 24-ординатному методу гармонического анализа. Производился гармонический анализ, с использованием стандартной программы расчета Matlab; при этом определялись значения косинусных и синусных коэффициентов.

После нахождения косинусных и синусных коэффициентов определились значения амплитуды и фазовых углов:

$$b_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (14)$$

$$\psi_n = \arctg \frac{a_n}{b_n} \quad (15)$$

Поскольку постоянная составляющая a_0 из выраженной (12) зависят от модуля и конкретной величины износа, то её необходимо умножить на амплитуду колебаний функции передаточного отношения при рассматриваемом модуле и величине износа. Тогда функция передаточного отношения, для рассматриваемого модуля и данной величины износа, после преобразований может быть записана в виде:

$$i_{12} = \frac{z_2 + 1.8 \cdot k_{\Delta S}}{z_1 - 1.8 \cdot k_{\Delta S}} + \frac{z_2 - 1.3 \cdot k_{\Delta S}}{z_1 + 1.3 \cdot k_{\Delta S}} + \left[\frac{z_2 + 1.8 \cdot k_{\Delta S}}{z_1 - 1.8 \cdot k_{\Delta S}} - \frac{z_2 - 1.3 \cdot k_{\Delta S}}{z_1 + 1.3 \cdot k_{\Delta S}} \right] \frac{\Delta i_{12}}{2};$$

$$\Delta i_{12} = \sum_{n=1}^n b_n \cdot \sin (n z_1 \varphi_1 + \psi_n) \quad (16)$$

$$k_{\Delta S} = \frac{1,1^{\Delta S} - 1,1^{-\Delta S}}{1,1^{\Delta S} + 1,1^{-\Delta S}}$$

Разложение экспериментальной кривой функции передаточного отношения всех испытываемых пар показало, что можно ограничиться четырьмя гармониками, так как компоненты четвёртой гармоники составляют всего 0,5+1% от амплитуды первой гармоники.

Имея зависимости и функции передаточного отношения всех испытываемых пар, и определенные с помощью слепков, профили зубьев, можно графически построить линию зацепления (рис. 5). При этом, принимая во внимание, что в изношенных передачах центры зубчатых колёс будут некруглыми, положение мгновенных полюсов, с учётом переменности передаточного отношения, определялись из соотношения:

$$r_1 = \frac{a_\omega}{(i_{12} + 1)} \quad (17)$$

$$r_2 = \frac{a_\omega}{(i_{12} + 1)} \cdot i_{12} \quad (18)$$

где i_{12}^1 - гармоническая функция и определяется из уравнения (10)

Изменение функции передаточного отношения приводит к изменению не только кинематических параметров передач, но и динамики зацепления [4]. Возрастание же динамической составляющей нагрузки с одновременным уменьшением толщины зуба уменьшает ресурс работы передачи из условия изгибной прочности [4, 10].

Рассмотрение линий зацепления различных этапов износа (рис. 5) всех зубчатых пар показало, что по характеру они практически не отличаются друг от друга, изменяется только участок входа и выхода пары зубьев из зацепления. Последнее приводит к изменению условий контактирования пары зубьев. Амплитуда колебаний возрастает с увеличением модуля: при модуле 5 мм амплитуда на 30% больше, чем при 2 мм.

Исходя из теории зубчатых зацеплений [4, 6] изменение кривой линии зацепления и профилей контактирующих зубьев неразрывно связано с изменением приведенного радиуса кривизны зубьев, скорости относительного скольжения, и направления вектора нормального усилия зацепления за весь период зацепления пары зубьев. Это параметры, которые определяют скорость изнашивания [1, 6], контактную и изгибную прочность [5]. Знание изменения размаха колебаний при изнашивании, изгибной и контактной жёсткости зубьев позволяют на разных стадиях диагностики прогнозировать величину и изменение динамической составляющей нагрузки.

Таким образом, в отличие от методики И. В. Крагельского, определив скорость изнашивания передачи с учётом изменения геометро-кинематических параметров и предельную величину износа из условия изгибной прочности, можно вычислить остаточный ресурс работы передачи T_i в часах.

$$T_i = \frac{([\Delta S] - \Delta S_i) \cdot S_\omega}{100 \cdot j \cdot V_{iKb}} \quad (19)$$

Анализ зависимости показывает, что ресурс находится в прямой зависимости от скорости скольжения, которая является, в том числе функцией величины износа, линии зацепления и функции передаточного отношения. Проведенные расчеты для передачи с модулем $m=4$, $z_1=18$, HRC45 показали, что при расчете по методике, предложенной нами, в отличие от методики Крагельского при износах от 8% до 32% совпадение ресурса от реального - экспериментального отличалось не более чем на 14%. Экспериментально такая величина износа достигнута за $64 \cdot 10^6$ циклов, при расчетах по формуле (18) получили $64,24 \cdot 10^6$ циклов (по методике Крагельского - $72 \cdot 10^6$ циклов).

Результаты проведенных исследований дают возможность прогнозировать ресурс работы высоконагруженных передач, подверженных изнашиванию на любой стадии их диагностирования при эксплуатации и при проектировании. Это позволяет назначать межремонтные циклы, заказывать запасные колеса, сократив сроки ремонта.

Выводы. 1. При абразивном изнашивании высоконагруженных передач вместе с изменением формы профилей зубьев изменяется и закон относительного движения колёс. Функция передаточного отношения становится переменной, она носит гармонический характер

с периодом, равным зубцовой частоте. Размах колебаний при изнашивании возрастает, особенно в начальный период изнашивания. По мере увеличения износа рост размаха колебаний замедляется и при износе свыше 15 - 20% размах колебаний практически стабилизируется. Колебания при изнашивании могут достигать значительной величины (в наших опытах при износе, порядка 18% и более, при малом числе зубьев шестерни $z_1=12$ и модулем зацепления $m=5$, со смещением и без смещения исходного контура, отношение достигало 1,3).

2. Линия зацепления при изнашивании искривляется. Начало и конец зацепления сдвигаются по ходу вращения зубчатых колёс. Коэффициент перекрытия при этом по мере износа уменьшается и при износе свыше 18-20% практически стабилизируется в пределах 1,03-1,1. Уже при износе 2 - 3% в конце линии зацепления появляется участок обратного контакта зубьев, который с увеличением износа расширяется, интенсивность роста участка обратного контакта по мере изнашивания уменьшается.

3. Изменения линии зацепления при изнашивании при разных модулях, передаточных числах, твёрдости зубьев и наличия или отсутствия смещения исходного контура имеют схожий характер.

Литература

- 1 Onishchenko V. Investigation of tooth wears from scuffing of heavy duty machine spur gears. Mechanism and Machine Theory. Vol. 83. 2015. p. 38-55. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2014.08.016.
- 2 Дубовик Е.А. Особенности изнашивания зубчатых передач трансмиссий // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 3. С. 31-35. ISSN: 1819-2092. ID: 23307529.
- 3 Мирзаев К.К., Мустаева Б.У. Износостойкость зубчатых передач, работающих в абразивной среде // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2019. № 3 (60). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/7063> (дата обращения: 30.03.2020).
- 4 Исследования изменения динамических нагрузок при изнашивании цилиндрических зубчатых передач сельскохозяйственных машин / Попов А.М., Мехдиев Р.В., Майтаков А.Л., и др. // АПК России. 2024. т.31.с. 372-379. doi:10.55934/2587-8824-2024-31-3-372-379.
- 5 Краснов Ю.В., Никандров И.С., Горшков А.С. Оценка вероятности безотказной работы передач из-за отказов, вызванных износом, контактной и изгибной усталостью // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 3. С. 67-72. URL: <https://top-technologies.ru/article/view?id=36938> (дата обращения: 16.01.2025).
- 6 Прохоров В. П., Тимофеев Г. А., Чернышева И. Н. Эволюция плоского эвольвентного зацепления при износе от истирания // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 2(659). С. 14-21.
- 7 Метод оценки остаточного ресурса зубчатых передач в межремонтный период / Н. Н. Ишин, А. М. Гоман, А. С. Скороходов [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. 2021. № 2(55). С. 5-17. doi: 10.46864/1995-0470-2021-2-55-5-17.
- 8 Калинин Д. В., Темис Ю. М. Анализ влияния сил трения в зацеплении на динамические нагрузки в зубчатых передачах // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 6(699). С. 32-43. doi: 10.18698/0536-1044-2018-6-32-43.
- 9 Zheng F., Zhang J., Yao L., Investigation on the wear of spur gears generated by modified cutter. Friction, 9 (2021) 288-300. 9(2): 288-300 (2021) ISSN 2223-7690 doi: 10.1007/s40544-019-0337-8.
10. Effects of tooth modifications on the dynamic characteristics of thin-rimmed gears under surface wear / Y. Huangfu, Z. Zhao, H. Ma, et al. // Mechanism and Machine Theory. 150 (2020) 103870.

References.

- 1 Onishchenko V. Investigation of tooth wears from scuffing of heavy duty machine spur gears. Mechanism and Machine Theory. Vol.83. 2015; 38-55 p. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2014.08.016.
- 2 Dubovik EA. [Features of wear of transmission gears]. Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizмах. 2015; 3. 31-35 p. ISSN: 1819-2092. ID: 23307529.
- 3 Mirzaev KK, Mustaeva BU. [Wear resistance of gears operating in an abrasive environment]. Universum: tekhnicheskie nauki: elektron. nauchn. zhurn. 2019; 3 (60). [cited 2020, March 30]. Available from: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/7063>.
4. Popov AM, Mekhdiev RV, Maytakov AL. [Research of changes in dynamic loads during wear of cylindrical gear transmissions of agricultural machinery]. APK Rossii. 2024; Vol.31. 372-379 p. doi: 10.55934/2587-8824-2024-31-3-372-379.
5. Krasnov YuV, Nikandrov IS, Gorshkov AS. [Assessment of probability of failure-free operation of gears due to failures caused by wear, contact and bending fatigue]. Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2018; 3. 67-72 p. [cited 2025, January 16]. Available from: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36938>.

6. Prokhorov VP, Timofeev GA, Chernysheva IN. [Evolution of flat involute gearing under wear from abrasion]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*. 2015; 2(659). 14-21 p.
7. Ishin NN, Goman AM, Skorokhodov AS. [Method for assessing the residual life of gears in the inter-repair period]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*. 2021; 2(55). 5-17p. doi: 10.46864/1995-0470-2021-2-55-5-17.
8. Kalinin DV, Temis YuM. [Analysis of friction forces impact in the engagement on dynamic loads in gear transmissions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*. 2018; 6(699). 32-43 p. doi: 10.18698/0536-1044-2018-6-32-43.
9. Zheng F, Zhang J, Yao L. Investigation on the wear of spur gears generated by modified cutter. *Friction*, 9. 2021; 288-300 p. 9 (2). 288-300 p. (2021) ISSN 2223-7690 doi: 10.1007/s40544-019-0337-8.
10. Huangfu Y, Zhao Z, Ma H. Effects of tooth modifications on the dynamic characteristics of thin-rimmed gears under surface wear. *Mechanism and Machine Theory*. 150. 2020; 103870.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Попов Анатолий Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры мехатроники и автоматизации технологических систем Кемеровского государственного университета (650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Красная, д.6), e-mail: popov4116@yandex.ru, ORCID 0000-0003-0728-7211

Плотников Константин Борисович – доктор технических наук, профессор кафедры мехатроники и автоматизации технологических систем Кемеровского государственного университета (650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Красная, д.6), e-mail: k.b.plotnikov.rf@gmail.com, ORCID 0000-0003-4145-0027

Мехдиев Рауф Валех Оглы – ассистент кафедры мехатроники и автоматизации технологических систем Кемеровского государственного университета (650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Красная, д.6), e-mail: mehdiev23@mail.ru, ORCID 0009-0005-5536-5482

Майтаков Анатолий Леонидович – доктор технических наук, профессор кафедры управления качеством Кемеровского государственного университета (650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Красная, д.6), e-mail: may585417@mail.ru, ORCID 0000-0002-0714-204X

Ветрова Надежда Тolibджоновна – кандидат технических наук, доцент кафедры управления качеством Кемеровского государственного университета (650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Красная, д.6), e-mail: veteroknadi@mail.ru, ORCID 0000-0002-7131-0511

Вклад авторов:

А.М. Попов – научное руководство проектом, формулирование идеи, гипотезы и цели исследования, проверка результатов и воспроизводимости;

К.Б. Плотников – разработка методов и процедур, разработка методов и процедур, создание программного обеспечения, скриптов и алгоритмов, проверка результатов и воспроизводимости;

Р.В. Мехдиев – проведение экспериментов и сбор данных, написание первоначального текста статьи, статистический или теоретический анализ данных;

А.Л. Майтаков – разработка методов и процедур, управление данными: подготовка, аннотирование и хранение, проверка результатов и воспроизводимости, редактирование и доработка текста, организационное управление проектом;

Н.Т. Ветрова – проведение экспериментов и сбор данных, написание первоначального текста статьи, статистический или теоретический анализ данных, создание графиков, схем и иллюстраций.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 24.01.2025; одобрена после рецензирования 06.12.2025; принята к публикации 01.04.2026.

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

Authors:

Popov Anatoliy Mikhaylovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of Mechatronics and Automation of Technological Systems Department Kemerovo State University (6 Krasnaya Street, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: popov4116@yandex.ru, ORCID 0000-0003-0728-7211

Plotnikov Konstantin Borisovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of Mechatronics and Automation of Technological Systems Department Kemerovo State University (6 Krasnaya Street, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: k.b.plotnikov.rf@gmail.com, ORCID 0000-0003-4145-0027

Mekhdiev Rauf Valekh Ogly – assistant of Mechatronics and Automation of Technological Systems Department Kemerovo State University (6 Krasnaya Street, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: mehdiev23@mail.ru, ORCID 0009-0005-5536-5482

Maytakov Anatoliy Leonidovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of Quality Management Department Kemerovo State University (6 Krasnaya Street, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: may585417@mail.ru, ORCID 0000-0002-0714-204X

Vetrova Nadezhda Tolibdzhonovna – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor of Quality Management Department Kemerovo State University (6 Krasnaya Street, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: veteroknadi@mail.ru, ORCID 0000-0002-7131-0511

Contribution of the authors:

A.M. Popov — Scientific supervision of the project, Formulation of the research idea, hypothesis, and objectives, Verification of results and reproducibility;

K.B. Plotnikov — Development of methods and procedures, Development of software, scripts, and algorithms, Verification of results and reproducibility;

R.V. Mekhdiev — Conducting experiments and data collection, Drafting the initial version of the article, Statistical or theoretical data analysis;

A.L. Maytakov — Development of methods and procedures, Data management: preparation, annotation, and storage, Verification of results and reproducibility, Text editing and revision, Organizational project management;

N.T. Vetrova — Conducting experiments and data collection, Drafting the initial version of the article, Statistical or theoretical data analysis, Creation of graphs, diagrams, and illustrations.

The authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 24.01.2025; revised 06.12.2025; accepted 01.04.2026.



АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ДОЗИРОВАНИЕМ ТУКОСМЕСИ
ДЛЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ШТАНГОВОГО АГРЕГАТА© 2026 Ридный С.Д.¹✉, Кулаев Е.В.¹, Димитров А.А.¹, Халиуллин Д.Т.²,
Мастепаненко М.А.¹¹Ставропольский государственный аграрный университет
(г. Ставрополь, Российская Федерация)²Казанский государственный аграрный университет
(г. Казань, Российская Федерация)

✉ ridnyy@mail.ru

Реферат. Исследования по внедрению технологий точного земледелия в Ставропольском ГАУ, проводимые в 2012-2025 годы, выявили высокую неравномерность уровня концентрации основных питательных элементов внутри одного поля. Анализ научных исследований позволил сделать вывод об отсутствии решений проведения тукосмешивания в полевых условиях специализированным агрегатом, оборудованным тремя отсеками для нахождения в них однокомпонентных минеральных удобрений с индивидуальными дозаторами, обеспечивающими точное дозирование каждого элемента с одновременным внесением. Целью настоящего исследования является разработка алгоритмической модели автоматизированной системы управления одновременным дозированием питательных элементов тукосмеси для пневматических штанговых агрегатов. Методика включала полевые эксперименты с автоматизированным отбором проб, картографированием NPK в AGRO MAP и разработкой системы дозирования трёх удобрений для пневматического агрегата. Разработан алгоритм с погрешностью $\Delta = 3-5\%$. Имитационное моделирование выполнено на Python (ПИД-регулятор, метод Ziegler–Nichols) для скоростей 5–25 км/ч и плотности 900–1300 кг/м³ (225 расчётов) с построением карт погрешности. Результаты моделирования показали, что система обеспечивает возвращение фактического расхода к заданному значению в пределах допустимой погрешности ($\Delta = 3-5\%$) за время не более 3 с после возникновения возмущения. Параметрическое моделирование в диапазоне скоростей 5–25 км/ч и насыпной плотности 900–1300 кг/м³ подтвердило устойчивость алгоритма: средняя погрешность дозирования составила 2,9%, максимальная – 4,7%, превышение допуска в 5% – менее 2%. Применение замкнутого контура позволяет снизить среднюю погрешность дозирования с 15–20% (для традиционных разомкнутых систем) до 3–5%, что соответствует агротехническим требованиям. Система управления с разработанным алгоритмом позволяет осуществлять проверку и коррекцию как общей суммарной подачи, так и подачи каждого компонента NPK в отдельности.

Ключевые слова: тукосмесь, дозирование, точное земледелие, пневматический штанговый агрегат, алгоритм, замкнутый контур.

Для цитирования: Алгоритмическая модель управления дозированием тукосмеси для пневматического штангового агрегата / С.Д. Ридный, Е.В. Кулаев, А.А. Димитров и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 99-109. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-99-109

ALGORITHMIC CONTROL MODEL FOR FERTILIZER MIXTURE DOSING FOR
A PNEUMATIC BOOM SPREADER© 2026 Ridnyy S.D.^a✉, Kulaev E.V.^a, Dimitrov A.A.^a, Khaliullin D.T.^b,
Mastepanenko M.A.^a^aStavropol State Agrarian University
(Stavropol, Russian Federation)^bKazan State Agrarian University
(Kazan, Russian Federation)

✉ ridnyy@mail.ru

Abstract. Research on precision farming technologies implementation at Stavropol State Agrarian University, conducted from 2012 to 2025, revealed high variability in the concentration of key nutrients within a single field. An analysis of scientific research revealed that there are no solutions for field-based fertilizer mixing using a specialized unit, equipped with three compartments for storing single-component mineral fertilizers with individual dispensers, ensuring precise dosing of each element with simultaneous application. The aim of this study is to develop an algorithmic model for an automated control system for simultaneous dosing of fertilizer mixture nutrients for pneumatic boom spreaders. Methodology included field experiments with automated sampling, NPK mapping in AGRO MAP and development of a dosing system for three fertilizers for a pneumatic unit. An algorithm with an error

of $\Delta = 3-5\%$ was developed. Simulation modeling was performed in Python (PID controller, Ziegler–Nichols method) for speeds of 5–25 km/h and densities of 900–1300 kg/m³ (225 calculations) with the construction of error maps. The modeling results showed that the system ensures that the actual flow rate returns to the set value within the permissible error ($\Delta = 3-5\%$) within no more than 3 seconds after the onset of a disturbance. Parametric modeling across a speed range of 5–25 km/h and bulk densities of 900–1300 kg/m³ confirmed the algorithm's robustness: the average dosing error was 2.9%, the maximum was 4.7% and the 5% tolerance was less than 2%. Using a closed-loop system reduces the average dosing error from 15–20% (for traditional open-loop systems) to 3–5%, which meets agronomic requirements. The control system with developed algorithm enables verification and adjustment of both the total application rate and the application rate of each NPK component individually.

Key words: fertilizer mixture, dosing, precision farming, pneumatic boom unit, algorithm, closed-loop system.

For citation: Ridnyy SD, Kulaev EV, Dimitrov AA, et al. [Algorithmic control model for fertilizer mixture dosing for a pneumatic boom spreader]. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2026; Vol. 21. 1(81). 99–109 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-99-109

Введение. Повышение эффективности растениеводства в современных условиях агропромышленного комплекса неразрывно связано с внедрением ресурсосберегающих и высокоточных геоинформационных агротехнологий точного земледелия [1, 2, 3]. Ключевым элементом данной стратегии является прецизионное внесение минеральных удобрений, которое позволяет не только оптимизировать затраты и минимизировать антропогенную нагрузку на агроценозы, но и обеспечивать максимальную реализацию потенциала урожайности сельскохозяйственных культур. Важнейшим условием достижения этих целей служит строгое соблюдение агротехнических требований, среди которых равномерность распределения и точное дозирование удобрений по площади поля выступают на первый план [4, 5, 6].

Многочисленные исследования технологий точного земледелия в области применения удобрений показывают, что каждый участок поля требует определенного соотношения макро и микроудобрений в зависимости от агрохимических показателей почвы и потребностей сельскохозяйственных культур. Данные требования могут быть реализованы путем приготовления тукосмесей непосредственно в поле в процессе движения агрегата [7]. Неравномерное внесение туков приводит к пестроте посевов, локальному химическому токсикозу растений при передозировке и недобору урожая при недостатке питания.

Среди основных агрегатов для внесения минеральных удобрений различают центробежного и штангового типа [8]. Внесение минеральных удобрений агрегатами центробежного типа приводит к значительному отклонению равномерности внесения от агротехнических требований, что влечет перерасход удобрений и пестроту развития растений. Наиболее близким агрегатом, отвечающим всем агротехническим требованиям к дифференцированному внесению тукосмесей, являются агрегаты штангового типа.

Пневматические штанговые агрегаты, такие как, Rauch AGT 6036 и Valmar 9620 компании Salford обрабатывающие полосы шириной до 36 м, являются высокоэффективными средствами для механизации данного

процесса, однако в их конструкции предусмотрено наличие одного бункера для рассеиваемого материала. Для внесения тукосмеси, состоящей как минимум из трех основных макроэлементов (N, P, K), требуется три отсека, три дозирующих устройства, а также разработка программного обеспечения, которое на основе единых алгоритмов будет координировать их взаимодействие. Существующие на отечественном рынке пневматические агрегаты штангового типа в основном оснащены механическими объемными дозаторами. Отсутствие обратной связи в таких системах приводит к тому, что при изменении влажности воздуха, плотности удобрений из-за вибраций или уклона поля, фактическая норма внесения отклоняется от заданной на 15–25% [9].

Научные исследования демонстрируют перспективность систем с обратной связью. Так, система Electronic Massflow Control (EMC) компании RAUCH обеспечивает независимое электронное дозирование для каждой дозирующей системы, используя высокоскоростные двигатели SpeedServo для точного позиционирования заслонок [10]. Компания Salford также развивает направление цифровой настройки, которая позволяет корректировать параметры внесения на основе анализа фактического дозирования удобрений с учетом их востребованности на каждом элементарном участке поля [11]. Эти решения позволяют снизить погрешность дозирования до 8–10%, однако полностью устранить влияние изменчивости сыпучей среды в реальном времени пока не удастся. В России также ведутся работы в этом направлении, например, создание специализированных контроллеров для дозирующих органов, интегрированных с ГИС-технологиями и обладающих функциями самодиагностики [12, 13, 14].

В современных условиях переход к точному земледелию (Precision Agriculture) требует интеграции интеллектуальных систем дозирования, способных в режиме реального времени корректировать норму внесения каждого элемента на основе электронных карт-заданий [15].

Существующие конструкции машин часто оснащаются системами управления с

разомкнутым контуром, где задание формируется на основе скорости движения агрегата, но без учета реальной подачи материала. Проблема заключается в отсутствии адаптивных алгоритмов управления, способных в реальном времени компенсировать вариабельность физико-механических свойств материалов и обеспечить точность дозирования на уровне 3–5%. Разработка алгоритма управления дозированием каждого отсека с однокомпонентными минеральными удобрениями с обратной связью для системы управления, позволяющая отслеживать фактическую подачу материала и динамически корректировать работу дозирующего органа для строгого соблюдения заданной картой-заданием нормы внесения является весьма актуальной задачей, на решение которой нацелены данные исследования.

Целью настоящего исследования является разработка алгоритмической модели автоматизированной системы управления одновременным дозированием питательных элементов тукосмеси для пневматических штанговых агрегатов.

Для достижения цели поставлены задачи:

1. Выполнить системный анализ возмущающих факторов, действующих на рабочий процесс пневматического дозатора тукосмесей.

2. Разработать функциональную и структурную схемы системы управления с обратной связью.

3. Формализовать алгоритм ее функционирования, основанный на принципе замкнутого контура регулирования с корректировкой по отклонению фактической подачи от заданной нормы.

Условия, материалы и методы. В Ставропольском ГАУ с 2012 года проводились эксперименты в полевых условиях по внедрению геоинформационных агротехнологий точного земледелия. Основное внимание уделялось агрохимическому анализу образцов почвы. Все работы по отбору проб почвы выполнялись на основании методик точного земледелия с применением автоматических почвенных пробоотборников. Поля были разделены на участки, с которых отбирались пробы почвы по заранее разработанным траекториям движения. В результате исследований состава этих проб в агрохимической лаборатории были получены результаты, которые вносились в электронную программу AGRO MAP, после чего строилась электронная карта поля с визуализацией на ней распределения концентрации каждого исследованного питательного макро и микроэлементов (рис. 1) [9].

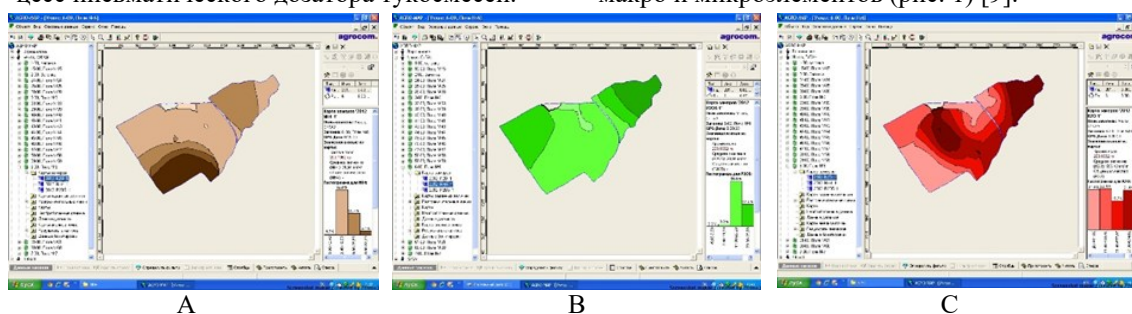


Рис. 1 – Концентрация распределения питательных макроэлементов по полю №6 учхоза СтГАУ (А – распределение азота (N); В – распределение фосфора (P); С – распределение калия (K))
Fig. 1 – Concentration distribution of essential macronutrients across field No. 6 of the educational farm of Stavropol State Agrarian University (A – nitrogen (N) distribution; B – phosphorus (P) distribution; C – potassium (K) distribution)

Объектом разработки является автоматизированная система управления дозированием трёх однокомпонентных минеральных удобрений (N, P, K) для пневматического штангового агрегата. В качестве основы принята разрабатываемая конструктивная схема агрегата с тремя независимыми бункерами и индивидуальными дозирующими устройствами шибера-ного типа с электрическим приводом.

Разработка алгоритмической основы автоматизированной системы управления процессом дозирования компонентов тукосмеси выполнена с использованием теоретических и аналитических методов: системного анализа, классификации возмущающих факторов, структурно-функционального анализа и формализации алгоритмов управления [16, 17].

Работы проведены на базовой кафедре машин и технологий АПК и в научно-испытательном центре Научного центра мирового уровня «Агроинженерия будущего»

ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет» в период с сентября 2012 года по май 2025 год.

Для определения диапазонов изменения параметров, влияющих на точность дозирования, проведены лабораторные исследования физико-механических свойств однокомпонентных минеральных удобрений (аммиачная селитра, суперфосфат, хлористый калий). Измерения выполнены по стандартизованным методикам: насыпная плотность – по ГОСТ 28512.1-90, влажность – по ГОСТ 8.613-2012, гранулометрический состав – ситовой анализ по ГОСТ 21560.1-82 [18]. Количество повторностей каждого измерения – не менее трёх. Установленные диапазоны варьирования ключевых параметров учитывались в дальнейшем при разработке алгоритма.

Разработка алгоритмической основы выполнена в три этапа.

Этап 1. Системный анализ и оценка возмущающих факторов. На основе анализа научно-технической литературы [7, 9, 18] и экспериментальных данных факторы, влияющие на точность дозирования, разделены на три группы: случайные (плотность, влажность, гранулометрический состав, рельеф поля), технологические (скорость движения, состав смеси, норма внесения) и управляемые (положение дозирующих заслонок, скорость транспортирования). Для каждой группы определены контролируемые параметры и количественные границы их варьирования.

Этап 2. Разработка функциональной и структурной схем системы управления. На основе выполненной классификации возмущающих факторов разработана структурная схема системы управления, отражающая состав аппаратных средств, информационные связи между элементами и принцип замкнутого контура управления с обратной связью по фактическому расходу каждого компонента тукоsmеси (рис. 2).

Этап 3. Формализация алгоритма управления. Для формализации алгоритма использован метод построения блок-схем в соответствии с ГОСТ 19.701-90 (ISO 5807-85). Алгоритм реализует двухуровневый контроль: сравнение суммарной подачи тукоsmеси с заданным значением и при необходимости – коррекцию подачи каждого компонента. Циклическое сравнение выполняется с допустимой погрешностью $\Delta = 3\text{--}5\%$ в соответствии с агротехническими требованиями. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 3.

Для оценки динамических характеристик разработанной алгоритмической модели проведено имитационное моделирование процесса управления дозированием на языке программирования Python с использованием библиотек NumPy, SciPy и Matplotlib. Модель реализует замкнутый контур регулирования с ПИД-регулятором, параметры которого настроены методом Ziegler–Nichols. Переходный процесс исследован при ступенчатом возмущающем воздействии. Для оценки устойчивости алгоритма выполнено параметрическое моделирование в диапазоне скорости движения агрегата от 5 до 25 км/ч и насыпной плотности удобрений от 900 до 1300 кг/м³. Всего выполнено 225 расчётов, по результатам которых построены карты распределения погрешности дозирования методом билинейной интерполяции. Статистическая обработка результатов выполнена с вычислением средних значений, среднеквадратичных отклонений и доверительных интервалов при уровне значимости 0,05 [19, 20].

Результаты и обсуждение. Наиболее распространённым способом дозирования в машинах для внесения минеральных удобрений является объёмный принцип, при котором подача материала определяется геометрическими параметрами дозирующего устройства и физико-механическими свойствами

тукоsmеси. В таких системах производительность дозатора зависит от плотности материала, состава смеси и скорости движения агрегата. При изменении указанных параметров фактический массовый расход отклоняется от заданного значения, что приводит к снижению точности внесения.

В отличие от традиционных систем, где регулирование основывается преимущественно на объёмном принципе и коррелируется лишь со скоростью движения агрегата, разработанный алгоритм предусматривает последовательное сравнение расчётных и фактических массовых расходов как по суммарной подаче, так и по каждому элементу смеси в отдельности. Тем самым реализован переход от статического задания нормы внесения к динамической коррекции подачи в пределах допустимой погрешности.

В результате выполнения теоретических исследований разработаны алгоритмическая основа, структурная схема и блок-схема автоматизированной системы управления дозированием компонентов тукоsmеси, а также получены расчётные зависимости для определения суммарной и покомпонентной подачи.

Расчёт требуемой суммарной подачи тукоsmеси выполняется на основе заданной нормы внесения q_0 (кг/га), рабочей ширины рассева B_p (м) и скорости движения агрегата V_m (м/с):

$$Q_0 = q_0 \cdot B_p \cdot V_m \cdot 10^{-4}. \quad (1)$$

Коэффициент 10^{-4} обеспечивает перевод нормы внесения с гектара на квадратный метр и согласование размерностей.

Дальнейшее распределение суммарной подачи по компонентам осуществляется пропорционально заданным долям элементов на конкретном участке поля:

$$Q_{\text{вы},i} = BY_i \cdot Q_0 \quad (2)$$

где $Q_{\text{вы}}$ – расчетная подача определенного элемента, кг/с; BY_i – доля элемента на участке (безразмерная величина), Q_0 – суммарная подача материала (кг/с).

Таким образом, реализуется управление не только по суммарному расходу тукоsmеси, но и по индивидуальным потокам N, P и K, что является отличительной особенностью разработанного алгоритма.

В процессе моделирования установлено, что основным управляющим воздействием $X(t)$ является величина открытия дозирующих заслонок, тогда как к возмущающим воздействиям $Z(t)$ относятся изменения насыпной плотности тукоsmеси, колебания скорости движения агрегата и случайные внешние факторы. Изменение плотности и динамические нагрузки, возникающие при движении, вызывают колебания фактической подачи $Y(t)$, что без реализации обратной связи приводит к накоплению систематической ошибки дозирования.

В разработанной структуре управления

реализован двухуровневый контроль: по суммарной подаче ($|Q_0 - Q_i| \leq \Delta$) и по каждому компоненту смеси ($|Q_{vy,i} - Q_{vy,i_act}| \leq \Delta$). При превышении допустимого отклонения формируется корректирующее воздействие, изменяющее положение соответствующих заслонок. Целевой диапазон точности регулирования принят в пределах 3–5 % от расчётной подачи, что соответствует агротехническим требованиям к внесению минеральных удобрений [5, 9].

Предложенный подход обеспечивает

адресное управление подачей на основе данных электронных карт-заданий и позволяет интегрировать систему в контур точного земледелия.

Для практической реализации предложенной логики регулирования была сформирована структурная схема системы мониторинга и управления дозированием. Схема отражает состав аппаратных средств, информационные связи между элементами и характер замкнутого контура управления. Структурная схема системы представлена на рис. 2.

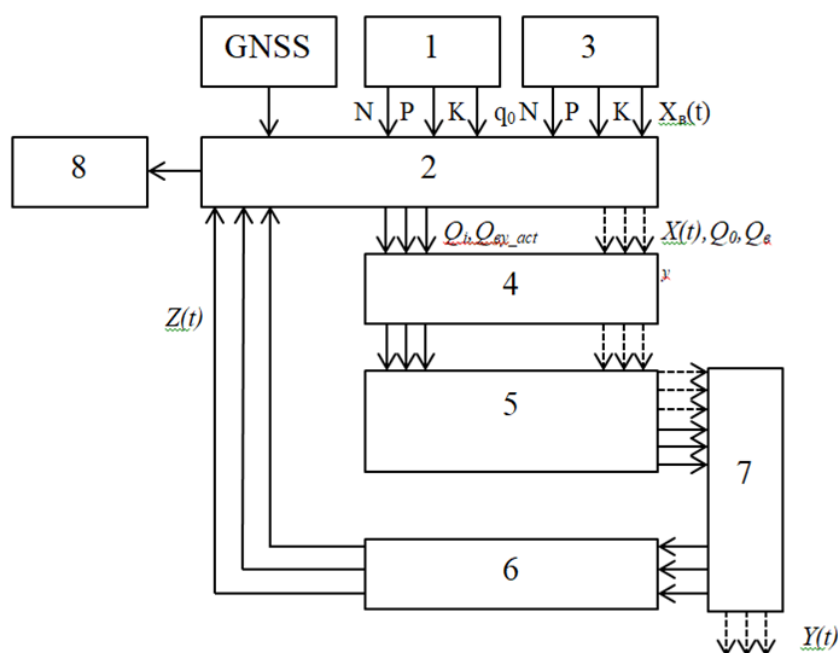


Рис. 2 – Структурная схема системы мониторинга и управления дозированием: 1 – внешнее управляющее устройство, 2 – блок управления, 3 – датчик уровня материала в бункере, 4 – АЦП, 5 – датчик открытия заслонки, 6 – датчик расхода тукосмеси, 7 – исполнительный механизм дозирующей системы, 8 – информационный блок, $Z(t)$ – возмущающие функции, $X(t)$ – управляющие функции, $X_b(t)$ – прочие случайные факторы, $Y(t)$ – подача материала
 —————> – путь расчетной информации управления; - - - - -> – путь скорректированной информации (второй уровень контроля)

Fig. 2 – Structural diagram of the monitoring and dosing control system: 1 – external control device, 2 – control unit, 3 – material level sensor in the hopper, 4 – ADC (analog-to-digital converter), 5 – gate opening sensor, 6 – fertilizer mix flow sensor, 7 – actuator of the dosing system, 8 – information unit, $Z(t)$ – disturbance functions, $X(t)$ – control functions, $X_b(t)$ – other random factors, $Y(t)$ – material supply
 —————> – path of calculated control information; - - - - -> – path of corrected information (second-level control)

Центральным элементом системы является блок управления 2, в него поступают сигналы от навигационной антенны GNSS, внешнего управляющего устройства 1 с заданием режима работы q_0 и датчиков уровня материала в бункере 3, который формирует сигналы в блоке управления об остановке агрегата, в случае отсутствия материала в бункере. На основе этих данных через аналогово-цифровой преобразователь 4 формируется управляющее воздействие на исполнительный механизм 7, а датчик расхода 6 поддерживает обратную связь. Таким образом осуществляется непрерывное

сравнение заданного режима работы с фактическими параметрами и последующая адаптивная корректировка процесса дозирования, на основании чего реализуется замкнутый контур регулирования подачи тукосмеси и контроля положения исполнительного механизма дозирующей системы.

Если структурная схема отражает состав аппаратных средств, то алгоритм функционирования системы определяет последовательность обработки информации и принятия решений. Формализованная блок-схема алгоритма работы системы представлена на рис. 3.

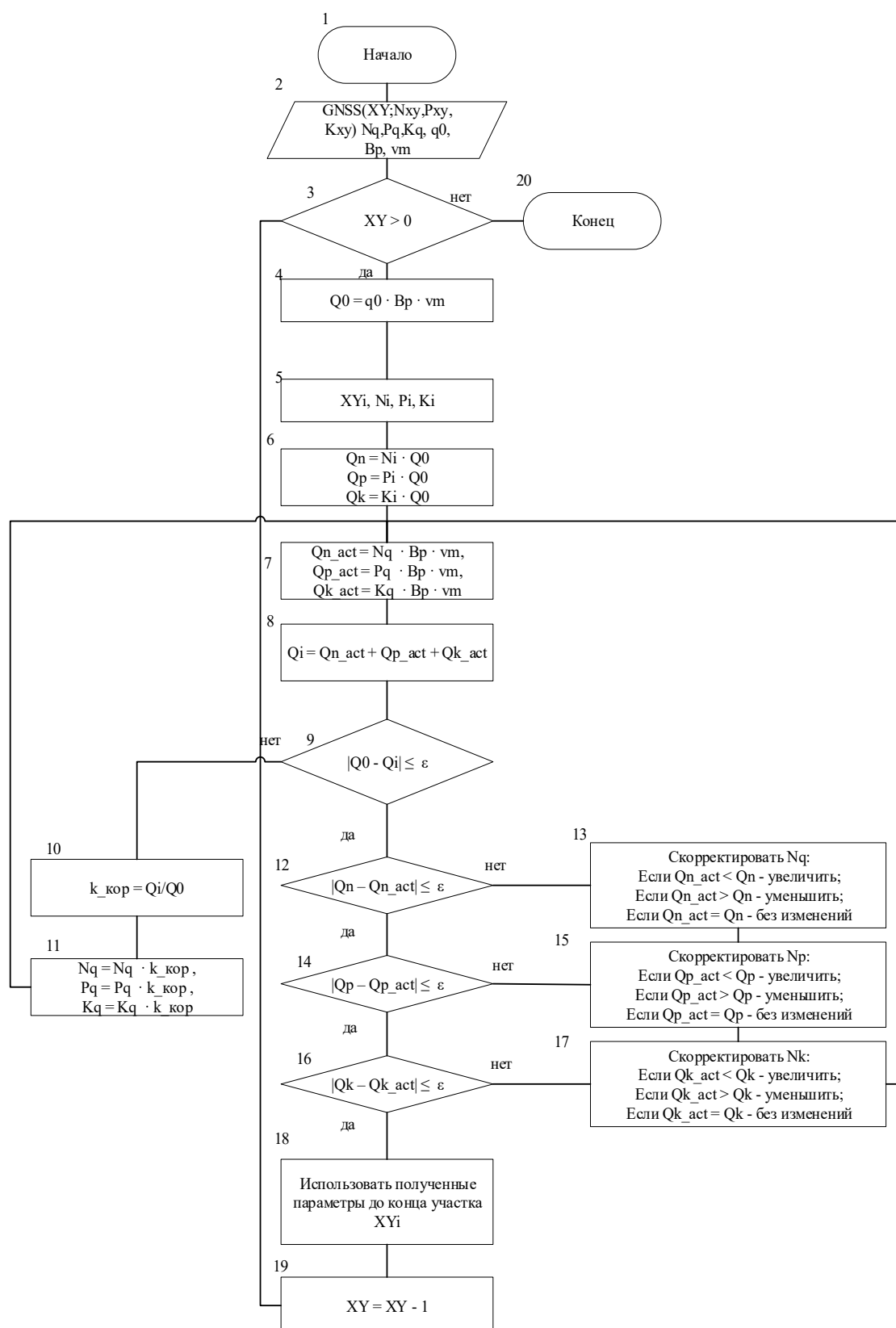


Рис. 3 – Блок-схема алгоритма работы системы мониторинга и управления подачей
Fig. 3 – Block diagram of the monitoring and supply control system operation algorithm

Алгоритм (рис. 3) реализует последовательную обработку участков поля. На каждом участке система рассчитывает суммарную подачу тукосмеси по формуле (1)

и покомпонентную подачу по формуле (2). Затем выполняется двухуровневый контроль: сначала сравнивается суммарная подача с фактическим значением, при необходимости

корректируется положение заслонок (блоки 9–11), затем аналогичная проверка выполняется для каждого компонента N, P, K в отдельности (блоки 12–17). После достижения допустимой точности параметры фиксируются, и система переходит к следующему участку.

Для последующей оценки точности работы системы предложен подход, основанный на определении максимальной погрешности агрегата как наибольшей из погрешностей его отдельных узлов. При допущении, что погрешности остальных узлов пренебрежимо малы или скомпенсированы, максимальная погрешность агрегата определяется по формуле:

$$\Delta_{\text{агр}} = \max(|\Delta_1|, |\Delta_2|, \dots, |\Delta_n|) \quad (3)$$

С учётом весовых коэффициентов влияния:

$$\Delta_{\text{агр}} = \max(|k_i| \cdot |\Delta_i|) \quad (4)$$

где $\Delta_{\text{агр}}$ – максимальная погрешность агрегата; Δ_i – погрешность i -го узла; k_i – коэффициент влияния i -го узла на выходной параметр; $\max$ – функция выбора наибольшего значения.

Расчёт конкретных значений погрешностей требует экспериментального определения характеристик датчиков и исполнительных механизмов и будет выполнен на этапе натурных испытаний. На основе анализа возмущающих факторов и паспортных характеристик датчиков расхода выполнена теоретическая оценка ожидаемой точности разработанной системы.

В традиционных системах с разомкнутым контуром управления отклонения физико-механических свойств удобрений (плотность, влажность, гранулометрический состав) непосредственно влияют на массовую подачу, что приводит к суммарной погрешности дозирования в диапазоне 15 – 20 % [13]. В разработанной системе с обратной связью по фактическому расходу управляющее воздействие формируется на основе непрерывного сравнения, заданного и измеренного значений, что позволяет компенсировать указанные возмущения. Предельная точность в замкнутом контуре определяется преимущественно погрешностью датчиков расхода, которая для выбранного типа оборудования составляет 2–3%, а также дискретностью управления исполнительными механизмами [10, 11].

Для оценки динамических характеристик разработанной алгоритмической модели было проведено математическое моделирование процесса управления дозированием в типовых условиях эксплуатации. В качестве базового сценария рассматривалась работа штангового агрегата со скоростью движения $V_m = 10$ км/ч и нормой внесения $q_0 = 200$ кг/га при ширине захвата $B_p = 36$ м. Расчет суммарной подачи выполнялся по формуле (1).

На рис. 4 представлены результаты моделирования переходного процесса системы управления, демонстрирующие реакцию фактического расхода на управляющее воздействие при возникновении отклонения от заданной нормы.

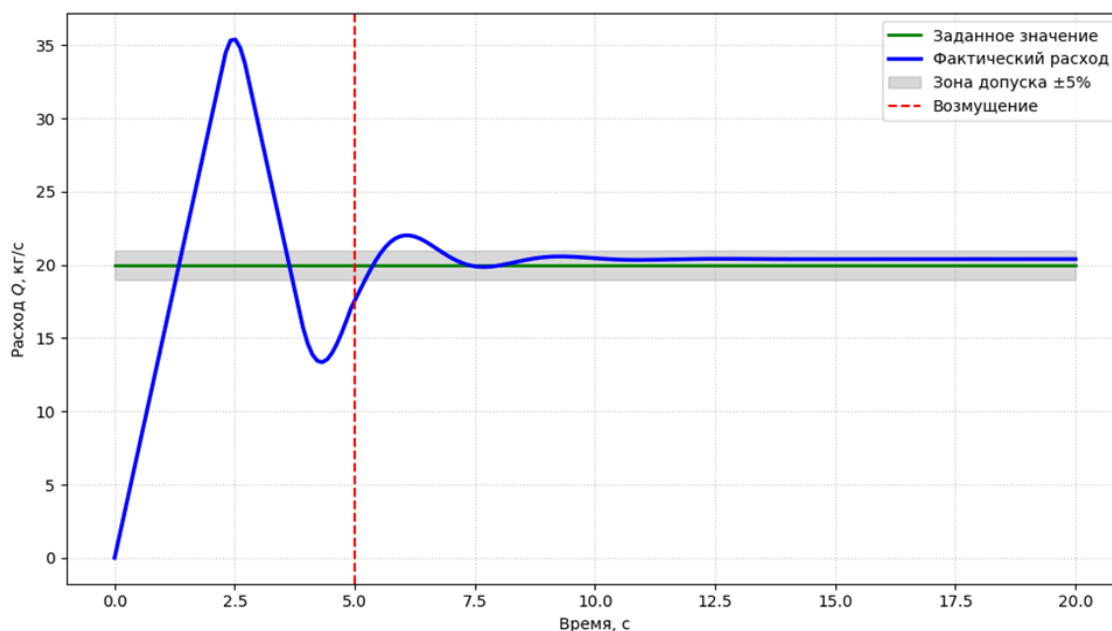


Рис. 4 – График переходного процесса системы управления дозированием: зеленая линия – заданное значение расхода ($Q_{\text{зад}}$); синяя линия – фактический расход ($Q_{\text{факт}}$); серая зона – допустимая погрешность регулирования ($\Delta = \pm 5\%$); вертикальная красная пунктирная линия – момент возникновения возмущающего воздействия

Fig. 4 – Graph of the transient process of the dosing control system: green line – set flow rate (Q_{set}); blue line – actual flow rate (Q_{actual}); grey zone – permissible regulation error ($\Delta = \pm 5\%$); vertical red dashed line – moment of disturbance occurrence

Анализ переходного процесса (рис. 4) наглядно подтверждает эффективность предложенного алгоритма управления с обратной связью. В момент времени $t \approx 5$ с, соответствующий возникновению возмущающего воздействия, наблюдается резкое отклонение фактического расхода от заданного значения.

Благодаря реализации принципа замкнутого контура регулирования, система формирует корректирующее воздействие на исполнительный механизм дозатора. Как видно из графика, алгоритм обеспечивает плавное возвращение фактического расхода к заданному значению. Время регулирования составляет не более 3 с, при этом максимальное динамическое отклонение не выходит за пределы допустимой погрешности $\pm 5\%$. Статистический анализ серии из 10 повторностей моделирования

переходного процесса показал: среднее время регулирования составило 2,84 с, среднеквадратичное отклонение – 0,32 с, максимальное динамическое отклонение не превысило 4,8% при доверительном интервале $\pm 0,3\%$ ($p < 0,05$). Полученные значения подтверждают устойчивость алгоритма и его способность возвращать систему в допустимый диапазон за время, не превышающее агротехнологически приемлемого.

Для оценки устойчивости разработанного алгоритма к изменению внешних условий была построена карта распределения погрешности дозирования (рис. 5). Моделирование проводилось в диапазоне рабочих скоростей движения агрегата от 5 до 25 км/ч и при изменении насыпной плотности удобрений в пределах от 900 до 1300 кг/м³.

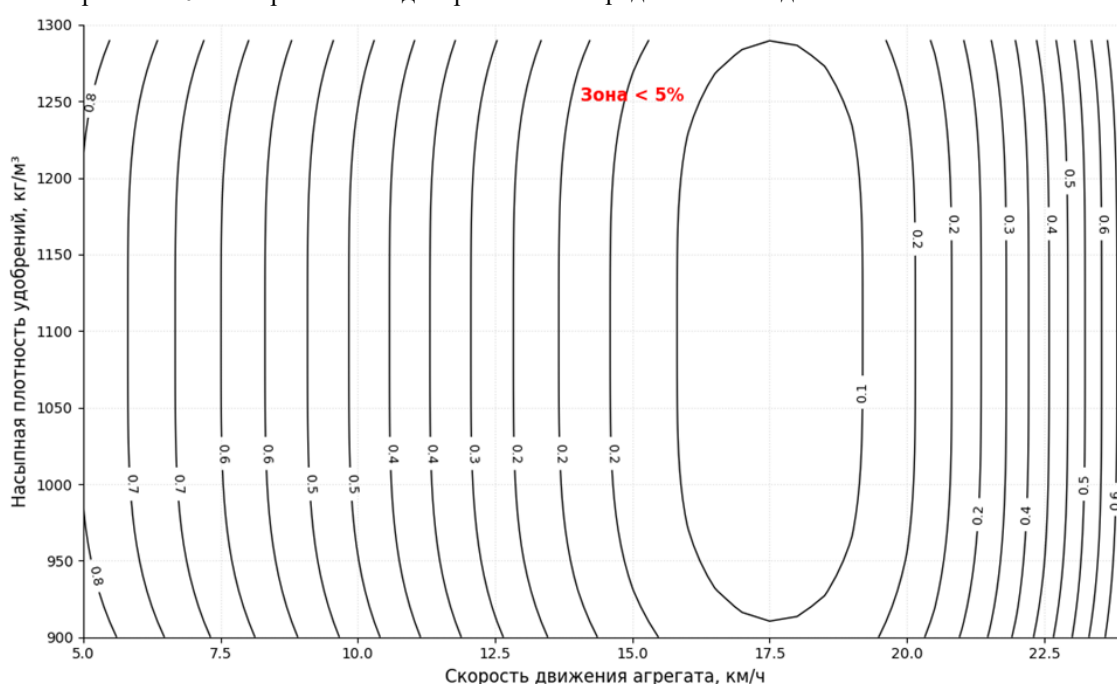


Рис. 5 – График распределения погрешности дозирования
Fig. 5 – Graph of dosing error distribution

Результаты параметрического моделирования представлены на карте распределения погрешности дозирования (рис. 5), где ось абсцисс соответствует скорости движения агрегата (V_m , км/ч), ось ординат – насыпной плотности материала (ρ , кг/м³), а замкнутые контуры отображают относительную погрешность дозирования Δ , %.

Статистическая обработка результатов 225 расчётных сценариев показала, что средняя погрешность дозирования во всём исследованном диапазоне составила 2,9%, при этом максимальная погрешность (4,7%) зафиксирована в зоне сочленения минимальной скорости (5 км/ч) и минимальной плотности (900 кг/м³). В диапазоне скоростей 8 – 22 км/ч и плотности 950–1250 кг/м³ погрешность не превышает 3,5%. Доля сценариев, в которых погрешность превысила установленный агротехнический допуск в 5%, составила менее 2%.

Контуры с изолиниями на графике выделяют зоны устойчивой работы системы, где итоговая погрешность дозирования не превышает установленного допуска. Как следует из представленной визуализации, алгоритм обеспечивает требуемую точность во всём диапазоне рабочих скоростей и для материалов с типичными значениями плотности.

Таким образом, теоретически достижимая точность дозирования в разработанной системе оценивается в диапазоне, соответствующей агротехническим требованиям к внесению минеральных удобрений. Разработанная алгоритмическая основа обеспечивает:

- замкнутый контур управления с обратной связью по фактическому расходу;
- двухуровневый контроль суммарной подачи и подачи каждого компонента (N, P, K) в отдельности;
- возможность компенсации возмущающих

факторов (изменение плотности, влажности, гранулометрического состава, скорости движения, уклонов поля), что недоступно традиционным объёмным системам.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на натурную верификацию предложенных алгоритмических решений в полевых условиях с использованием разработанного комплекса аппаратных средств.

Выводы. 1. По результатам системного анализа возмущающих факторов выполнена классификация факторов, влияющих на точность дозирования компонентов тукоосмеси в пневматических штанговых агрегатах. Факторы разделены на три группы: случайные (плотность, влажность, гранулометрический состав, рельеф поля), технологические (скорость движения, состав смеси, норма внесения) и управляемые (положение дозирующих заслонок, скорость транспортирования). Для каждой группы определены контролируемые параметры и установлены количественные диапазоны их варьирования (насыпная плотность 900–1300 кг/м³, скорость движения 5–25 км/ч), что позволило обосновать структуру системы управления с обратной связью.

2. В результате достижения цели исследования разработана алгоритмическая модель, представленная структурной схемой автоматизированной системы управления дозированием, реализующей замкнутый контур регулирования с обратной связью по фактическому расходу каждого компонента (N, P, K). Схема включает блок управления, датчики уровня и расхода, исполнительные механизмы, а также информационные связи, обеспечивающие двухуровневый контроль суммарной подачи и подачи каждого элемента в отдельности.

3. Выполнена формализация алгоритма работы системы в виде блок-схемы в соответствии с ГОСТ 19.701-90 (ISO 5807-85). Алгоритм предусматривает циклическое сравнение заданного и фактического расхода с допустимой погрешностью и формирование корректирующих воздействий на исполнительные механизмы при превышении установленного порога.

4. Получены расчётные зависимости для

определения суммарной подачи тукоосмеси и её распределения по компонентам в зависимости от нормы внесения, скорости движения агрегата и заданных долей элементов на элементарном участке поля (формулы 1 и 2). Предложен подход к оценке предельной погрешности системы на основе максимальной погрешности отдельных узлов (формулы 3 и 4).

5. Результаты математического моделирования подтвердили работоспособность и устойчивость разработанного алгоритма. Система обеспечивает возвращение фактического расхода к заданному значению в пределах допустимой погрешности ($\Delta = 3\text{--}5\%$) за время не более 3 с после возникновения возмущения (рис. 4) и сохраняет высокую точность дозирования во всём диапазоне эксплуатационных скоростей (5–25 км/ч) и вариаций насыпной плотности материала (900–1300 кг/м³) (рис. 5). Доля сценариев, в которых погрешность превысила установленный агротехнический допуск в 5%, составила менее 2%.

6. Применение предложенного алгоритма позволяет снизить среднюю погрешность дозирования с уровня 15–20% (характерного для разомкнутых систем) до уровня 3–5%, что подтверждено теоретической оценкой на основе анализа возмущающих факторов и паспортных характеристик датчиков расхода (погрешность 2–3%).

7. Дальнейшие исследования должны быть направлены на натурную верификацию предложенных алгоритмических решений в полевых условиях с использованием разработанного комплекса аппаратных средств.

Сведения о финансировании. Настоящая статья подготовлена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2025-591) в рамках реализации мероприятий программы развития научного центра мирового уровня «Агроинженерия будущего» Ставропольского ГАУ, утверждённой протоколом заседания президиума Комиссии по научно-технологическому развитию Российской Федерации от 29 мая 2025 года № 3.

Литература

1. The path to smart farming: innovations and opportunities in precision agriculture / Karunathilake EMBM, Le AT, Heo S, et al. // Agriculture. 2023. Vol. 13(8). P. 2-26. doi: 10.3390/agriculture13081593.
2. Precision agriculture techniques and practices: from considerations to applications / Shafi U, Mumtaz R, García-Nieto J, et al. // Sensors. 2019. Vol. 19:17. P. 2-25. doi:10.3390/s19173796.
3. Dhoubhadel SP. Precision agriculture technologies and farm profitability. // Journal of Agricultural and Resource Economics. 2021. Vol. 46(2). P. 256–268. doi: 10.22004/ag.econ.303598.
4. Monteiro A, Santos S, Gonçalves P. Precision agriculture for crop and livestock farming – Brief review. // Animals. 2021. Vol. 11(8). P. 23-45. doi:10.3390/ANI11082345.
5. Влияние удобрений на урожайность кукурузы в Ставропольском крае / В. Н. Багринцева, И. Н. Ивашенко, В. В. Дриггер и др. // Достижения науки и техники АПК. 2023. Т. 37. № 7. С. 29-33. doi: 10.53859/02352451_2023_37_7_29.
6. Сухаева А.Р., Бодякина Т.В., Балданов М.Б. К вопросу механизации внесения удобрений // Научный журнал молодых ученых. 2025. № 2(42). С. 51-55.
7. Сиднева И. Е., Курдюмов В. И., Павлушин А. А. Теоретическое обоснование параметров рабочего органа разбрасывателя минеральных удобрений // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 3(59). С. 6-11. doi: 10.18286/1816-4501-2022-3-6-11.
8. Димитров А. А. Типы агрегатов для внесения минеральных удобрений // Современные проблемы АПК: сборник научных статей Института механики и энергетики, приуроченный к 90-й

научно-практической конференции «Аграрная наука – Северо-Кавказскому федеральному округу». – Ставрополь, 2025. № 1. С. 205-208.

9. Разработка агрегата штангового типа с пневмотранспортной системой для дифференцированного внесения тукоомесей в ресурсосберегающих геотехнологиях точного земледелия / С.Д. Ридный, Е.В. Кулаев, Д.И. Грицай, и др. // Агроинженерия. 2025. № 6 (27). С. 60-66. doi: 10.26897/2687-1149-2025-6-60-66

10. Grift T. E. Mass Flow Measurement of Granular Materials in Aerial Application – Part 1: Simulation and Modeling // Transactions of the ASAE. – 2001. – Т. 44. – №. 1. – Pp. 19-26. doi: 10.13031/2013.2299

11. Grift T. E., Walker J. T., Hofstee J. W. Materials in Aerial Application – Part 2: Experimental Model Validation // Transactions of the ASAE. 2001. Т. 44. – №. 1. Pp. 27-34. doi: 10.13031/2013.2300

12. Макаров В.А., Темников В.Н., Темников К.В. Система приборного обеспечения дифференцированного внесения минеральных удобрений в ГИС-технологиях // Нива Поволжья. 2011. №1(18). С. 46-49.

13. Research and Design of Precision Fertilizer Application Control System Based on PSO-BP-PID Algorithm / Meng, Z., Zhang, L., Wang, H., et al. // Agriculture 2022, 12, 1395. doi: 10.3390/agriculture12091395

14. Новикова К.В. Автоматическое управление технологическими процессами в сельскохозяйственной технике // Научное Образование. 2024. № 3(24). С. 115-117.

15. Обоснование параметров пневмотранспортной системы пневматического типа с разделяющимися потоками в посевных комплексах и агрегатах для внесения твердых минеральных удобрений / С.Д. Ридный, Е. В. Кулаев, А.А. Димитров и др. // Аграрный научный журнал. 2025. № 12. С. 181–186. doi: 10.28983/asj.y2025i12pp181-186.

16. Бухмиров В.В., Родионов Г.А. Математическое моделирование двухфазных потоков в установках пневмотранспорта мелкодисперсных материалов // Вестник ИГЭУ. 2013. Вып. 5. С. 24-28.

17. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И. Моделирование работы пневмотранспорта в импульсно-поршневом режиме // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2018. №3(45). С. 6-9.

18. Попенко А. Ю. Теоретические исследования движения частицы удобрения в закрытом наклонном воздушном канале // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. №. 2 (88). С. 118-122.

19. Разработка алгоритмов для системы анализа и обработки информации / А.А. Соколов, Ф.В. Чихтисова, А.М. Коломыщ и др. // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. №6 (25). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-algoritmov-dlya-sistemy-analiza-i-obrabotki-informatsii> (Дата обращения 26.12.2025).

20. Разработка интеллектуальных алгоритмов для оптимизации автоматизации технологических операций / Василевский А.В., Хомченко А.Е., Макаров В.М. и др. // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2025. Том 15. № 4А. С. 190-199.

References

1. Karunathilake EMBM, Le AT, Heo S. The path to smart farming: innovations and opportunities in precision agriculture. Agriculture. 2023; Vol.13(8). 2-26 p. doi: 10.3390/agriculture13081593.

2. Shafi U, Mumtaz R, Garcia-Nieto J. Precision agriculture techniques and practices: from considerations to applications. Sensors. 2019; Vol.19:17. 2-25 p. doi: 10.3390/s19173796.

3. Dhoubhadel SP. Precision agriculture technologies and farm profitability. Journal of Agricultural and Resource Economics. 2021; Vol.46(2). 256-268 p. doi: 10.22004/ag.econ.303598.

4. Monteiro A, Santos S, Goncalves P. Precision agriculture for crop and livestock farming – Brief review. Animals. 2021; Vol.11(8). 23-45 p. doi: 10.3390/ANI11082345.

5. Bagrintseva VN, Ivashenko IN, Dridiger VV. [Influence of fertilizers on corn yield in Stavropol Krai]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2023; Vol.37. 7. 29-33 p. doi: 10.53859/02352451_2023_37_7_29.

6. Sukhaeva AR, Bodyakina TV, Baldanov MB. [On the issue of mechanization of fertilizer application]. Nauchnyy zhurnal molodykh uchenykh. 2025; 2(42). 51-55 p.

7. Sidneva IE, Kurdyumov VI, Pavlushin AA. [Theoretical substantiation of working unit parameters of mineral fertilizer spreader]. Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2022; 3(59). 6-11 p. doi: 10.18286/1816-4501-2022-3-6-11.

8. Dimitrov AA. [Types of units for applying mineral fertilizers. Modern problems of agro-industrial complex]. Sbornik nauchnykh statey Instituta mekhaniki i energetiki, priurochenny k 90-i nauchno-prakticheskoy konferentsii “Agrarnaya nauka – Severo-Kavkazskomu federalnomu okrugu”. Stavropol. 2025; 1. 205-208 p.

9. Ridnyy SD, Kulaev EV, Gritsay DI. [Development of a boom-type unit with a pneumatic transport system for differentiated application of fertilizer mixtures in resource-saving geoinformation agricultural technologies of precision farming]. Agroinzheneriya. 2025; 6 (27). 60-66 p. doi: 10.26897/2687-1149-2025-6-60-66

10. Grift TE. Mass flow measurement of granular materials in aerial application – Part 1: simulation and modeling. Transactions of the ASAE. 2001; Vol.44. 1. 19-26 p. doi: 10.13031/2013.2299

11. Grift TE, Walker JT, Hofstee JW. Materials in aerial application – Part 2: experimental model validation. Transactions of the ASAE. 2001; Vol.44. 1. 27-34 p. doi: 10.13031/2013.2300

12. Makarov VA, Temnikov VN, Temnikov KV. [Instrumentation system for differentiated application of mineral fertilizers in GIS technologies]. Niva Povolzhya. 2011; 1(18). 46-49 p.

13. Meng Z, Zhang L, Wang H. Research and design of precision fertilizer application control system based on PSO-BP-PID algorithm. Agriculture. 2022; 12. 1395 p. doi:10.3390/agriculture12091395

14. Novikova KV. [Automatic control of technological processes in agricultural machinery]. Nauchnoe obrazovanie. 2024; 3(24). 115-117 p.

15. Ridnyy SD, Kulaev EV, Dimitrov AA. [Justification the parameters of pneumatic transport system of a pneumatic type with dividing flows in seeding complexes and units for applying solid mineral fertilizers]. Agrarnyy nauchnyy zhurnal. 2025; 12. 181-186 p. doi: 10.28983/asj.y2025i12pp181-186.

16. Bukhmirov VV, Rodionov GA. [Mathematical modeling of two-phase flows in pneumatic transport units for finely dispersed materials]. Vestnik IGÉU. 2013; Issue 5. 24-28 p.

17. Velikanov NL, Naumov VA, Koryagin SI. [Modeling of pneumatic transport operation in pulse-piston mode]. *Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa*. 2018; 3(45). 6-9 p.
18. Popenko AYU. [Theoretical research of fertilizer particle motion in a closed inclined air channel]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021; 2 (88). 118-122 p.
19. Sokolov AA, Chikhtisova FV, Kolomyts AM. [Development of algorithms for an information analysis and processing system]. [Internet]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*. 2014; 6 (25). [cited 2025, December 26]. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-algoritmov-dlya-sistemy-analiza-i-obrabotki-informatsii>.
20. Vasilevskiy AV, Khomchenko AE, Makarov VM. [Development of intelligent algorithms for optimizing technological operations automation]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra*. 2025; Vol.15. 4A. 190-199 p.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Ридный Сергей Дмитриевич – кандидат технических наук, доцент, доцент базовой кафедры машин и технологий АПК Ставропольского государственного аграрного университета (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, д. 12), e-mail: ridnyy@mail.ru, ORCID 0009-0004-5187-029X

Кулаев Егор Владимирович – кандидат технических наук, доцент базовой кафедры машин и технологий АПК Ставропольского государственного аграрного университета (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, д. 12), e-mail: bratinsa@gmail.com, ORCID 0000-0003-4152-6239

Димитров Анатолий Анатольевич – ассистент кафедры электротехники, физики и охраны труда Ставропольского государственного аграрного университета (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, д. 12), e-mail: diagryp@gmail.com, ORCID 0009-0001-8321-4180

Халиуллин Дамир Тагирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин и оборудования в агробизнесе Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), e-mail: damirtag@mail.ru, ORCID 0000-0002-1941-0013

Мастепаненко Максим Алексеевич – кандидат технических наук, директор института механики и энергетики Ставропольского государственного аграрного университета (355017, Российская Федерация, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, д. 12), e-mail: [mma_26@inbox.ru](mailto:mmma_26@inbox.ru), ORCID 0000-0002-8684-118X

Вклад авторов:

С.Д. Ридный – поиск публикаций по теме статьи, написание текста рукописи, экспертная оценка, утверждение финальной версии;

Е.В. Кулаев — теоретические исследования;

А.А. Димитров – редактирование текста, создание изображений;

Д.Т. Халиуллин – редактирование текста, финальное утверждение рукописи;

М.А. Мастепаненко – формальный анализ, администрирование данных.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 07.10.2025; одобрена после рецензирования 31.03.2026; принята к публикации 01.04.2026.

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

Authors:

Ridnyy Sergey Dmitrievich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor of Basic Department of Agroindustrial Complex Machines and Technologies Stavropol State Agrarian University (12 Zootechnicheskyy Lane, Stavropol, 355017, Russian Federation), e-mail: ridnyy@mail.ru, ORCID 0009-0004-5187-029X

Kulaev Egor Vladimirovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor of Basic Department of Agroindustrial Complex Machines and Technologies Stavropol State Agrarian University (12 Zootechnicheskyy Lane, Stavropol, 355017, Russian Federation), e-mail: bratinsa@gmail.com, ORCID 0000-0003-4152-6239

Dimitrov Anatoliy Anatolevich – Assistant Professor of Electrical Engineering, Physics and Occupational Safety Department Stavropol State Agrarian University (12 Zootechnicheskyy Lane, Stavropol, 355017, Russian Federation), e-mail: diagryp@gmail.com, ORCID 0009-0001-8321-4180

Khaliullin Damir Tagirovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Agribusiness Machinery and Equipment Department Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: damirtag@mail.ru, ORCID 0000-0002-1941-0013

Mastepanenko Maksim Alekseevich – Ph.D. of Technical Sciences, Director of Mechanics and Power Engineering Institute Stavropol State Agrarian University (12 Zootechnicheskyy Lane, Stavropol, 355017, Russian Federation), e-mail: [mma_26@inbox.ru](mailto:mmma_26@inbox.ru), ORCID 0000-0002-8684-118X

Contribution of the authors:

S.D. Ridnyy – Search for publications on the article's topic, manuscript writing, expert review, approval of final version;

E.V. Kulaev – Theoretical research;

A.A. Dimitrov – Text editing, image creation;

D.T. Khaliullin – Text editing, final approval of the manuscript;

M.A. Mastepanenko – Formal analysis, data administration.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 07.10.2025; revised 31.03.2026; accepted 01.04.2026.



ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОЖИДКОСТНОГО СЕПАРАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ПЫЛИ

© 2026 Харьков В. В.¹✉, Николаев А. Н.¹, Зиганшин Б. Г.²¹Казанский национальный исследовательский технологический университет

(г. Казань, Российская Федерация)

²Казанский государственный аграрный университет

(г. Казань, Российская Федерация)

✉ v.v.kharkov@gmail.com

Реферат. Загрязнение воздушной среды производственной пылью на предприятиях агропромышленного комплекса оказывает многоплановое негативное воздействие, создавая прямую угрозу здоровью персонала, снижая срок службы оборудования и повышая риски возникновения чрезвычайных ситуаций для окружающей среды. Существующие методы очистки, особенно для частиц размером менее 10 мкм, часто неэффективны или энергозатратны. Целью работы является комплексное теоретическое обоснование и разработка аналитических моделей для оценки эффективности нового газожидкостного вихревого сепарационного устройства с тангенциально-лопаточным завихрителем, комбинирующего центробежный и инерционный механизмы сепарации в поперечном потоке. На основе анализа траекторий движения частиц и уравнений массопереноса были разработаны аналитические зависимости, позволяющие прогнозировать фракционную эффективность сепарации в зависимости от расходов газа (G) и орошающей жидкости (L). Установлено, что эффективность центробежной сепарации критически зависит от соотношения L/G: увеличение подачи жидкости снижает крутку потока. Так, для частиц диаметром 10 мкм при соотношении L/G = 0,12 эффективность достигает 80%, но падает до 18% при L/G = 0,47. В то же время эффективность инерционного осаждения на каплях жидкости зависит от нагрузки по жидкости, демонстрируя положительную корреляцию с размером частиц. Увеличение расхода жидкости с 21 до 168 кг/ч повышает эффективность инерционного механизма для частиц 10 мкм с 56% до 94%. Расчет суммарной эффективности сепарации подтверждает высокий потенциал устройства для улавливания широкого фракционного состава производственной пыли. Разработанные модели и полученные результаты создают основу для проектирования высокоэффективных систем пылеочистки, целенаправленно адаптированных к условиям агропромышленного комплекса, в частности для предприятий по производству комбикормов и переработке зерна.

Ключевые слова: вихревой сепаратор, пыль, орошение, эффективность разделения, производство кормов, зернопереработка.

Для цитирования: Харьков В.В., Николаев А.Н., Зиганшин Б.Г. Исследование эффективности газожидкостного сепарационного устройства для улавливания производственной пыли // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 110-118. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-110-118

STUDY THE EFFICIENCY OF GAS-LIQUID SEPARATION DEVICE FOR INDUSTRIAL DUST COLLECTION

© 2026 Kharkov V.V.^a✉, Nikolaev A.N.^a, Ziganshin B.G.^b^aKazan National Research Technological University

(Kazan, Russian Federation)

^bKazan State Agrarian University

(Kazan, Russian Federation)

✉ v.v.kharkov@gmail.com

Abstract. Air pollution by industrial dust at agricultural enterprises has a multifaceted negative impact, posing a direct threat to personnel health, reducing the service life of equipment and increasing the risk of environmental emergencies. Existing cleaning methods, especially for particles smaller than 10 µm, are often ineffective or energy-intensive. The aim of this study is to provide a comprehensive theoretical justification and develop analytical models for evaluating the efficiency of a new gas-liquid vortex separation device with a tangential vane swirler, combining centrifugal and inertial cross-flow separation mechanisms. Based on an analysis of particle trajectories and mass transfer equations, analytical relationships were developed that allow us to predict the fractional separation efficiency depending on the gas (G) and irrigating liquid (L) flow rates. It was found that efficiency of centrifugal separation is critically dependent on the L/G ratio: increasing the liquid feed reduces flow swirl. Thus, for particles with a diameter of 10 µm, with an L/G ratio of 0.12, the efficiency reaches 80%, but drops to 18% at L/G = 0.47. At the same time, the efficiency of inertial sedimentation on liquid droplets depends on the

liquid load, demonstrating a positive correlation with particle size. Increasing the liquid flow rate from 21 to 168 kg/h increases the efficiency of the inertial mechanism for 10 μm particles from 56% to 94%. Calculation of the overall separation efficiency confirms the high potential of the device for capturing a wide fractional composition of industrial dust. The developed models and obtained results provide the basis for designing highly efficient dust removal systems specifically tailored to the conditions of the agro-industrial complex, particularly for feed production and grain processing plants.

Key words: vortex separator, dust, irrigation, separation efficiency, feed production, grain processing.

For citation: Kharkov VV, Nikolaev AN, Ziganshin BG. [Study the efficiency of gas-liquid separation device for industrial dust collection]. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2026; Vol. 21. 1(81). 110-118 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-110-118

Введение. В агропромышленном комплексе (АПК) проблема пылеобразования носит системный характер, охватывая ключевые этапы послеуборочной обработки и переработки растительного сырья [1]. На элеваторах, мукомольных и комбикормовых заводах интенсивное выделение пыли сопровождается процессами приемки, транспортировки, сушки, дробления и гранулирования зерна и кормовых компонентов. Наиболее высокие концентрации пыли фиксируются в зонах работы норий, дробилок и смесителей. Специфика пыли на предприятиях АПК заключается в её полидисперсности и органическом происхождении, что обуславливает высокую пожаро- и взрывоопасность [2, 3]. Кроме того, мелкодисперсная фракция (менее 10 мкм) проникает в рабочую зону, создавая прямую угрозу здоровью персонала и провоцируя профессиональные заболевания органов дыхания, а оседающая пыль ускоряет абразивный износ дорогостоящего оборудования и снижает качество готовой продукции [4, 5].

Традиционно для очистки воздуха на предприятиях АПК применяются сухие инерционные пылеуловители, которые эффективны преимущественно для грубодисперсных частиц, но пропускают значительную часть фракции менее 10 мкм, составляющей до 40–60% выбросов мукомольного и комбикормового производств [6, 7]. Фильтрационные методы (в т.ч. рукавные фильтры) обеспечивают высокую степень очистки, однако их применение ограничивается высокими капитальными затратами, сложностью обслуживания в условиях повышенной влажности зерносушильных комплексов и риском забивания фильтрующих пор маслянистыми компонентами комбикормов [8, 9]. Мокрые методы очистки лишены этих недостатков, но требуют оптимизации энергопотребления и расхода воды [10].

Таким образом, актуальной задачей является разработка комбинированных методов, интегрирующих преимущества различных механизмов сепарации. В данной работе предлагается газожидкостное сепарационное устройство с тангенциально-лопаточным завихрителем, в котором одновременно реализуются два взаимодополняющих механизма: центробежный – для частиц средней и крупной дисперсности, и инерционный – для мелких частиц. Преимущество таких устройств заключается в образовании на периферии вращающегося капельного слоя, что повышает эффективность

сепарации за счёт осаждения мелких частиц на каплях [11, 12].

Разработка новых сепараторов на основе натуральных экспериментов требует значительных затрат, что часто неприемлемо для предприятий АПК малого и среднего масштаба. Альтернативой является создание аналитических моделей, основанных на фундаментальных законах и известных параметрах, что позволяет прогнозировать эффективность сепарации без дорогостоящих опытов.

Целью работы является комплексное теоретическое обоснование и разработка аналитических моделей для оценки эффективности газожидкостного сепарационного устройства с тангенциально-лопаточным завихрителем потока газа и комбинированным узлом окончательного разделения.

Условия, материалы и методы. Исследования проводились на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет». Объектом исследования выступило газожидкостное сепарационное устройство с тангенциально-лопаточным завихрителем, предназначенное для очистки аспирационного воздуха на предприятиях агропромышленного комплекса.

Конструкция исследуемого устройства включает корпус с рабочей зоной, завихритель потока газа и узел окончательного разделения фаз (рис. 1). Проходя с большой скоростью через тангенциально-лопаточный завихритель устройства, очищаемый запыленный газ приобретает вращательно-поступательное движение. В результате понижения давления в осевой части устройства происходит подсосывание жидкости из подводящего патрубка. Поток газа дробит жидкость на капли и вовлекает их в совместное движение. В результате образуется вращающийся капельный слой в непосредственной близости от лопастей завихрителя (зона поперечной сепарации). Выходя из зоны завихрителя, газожидкостный поток попадает в узел окончательного разделения фаз комбинированного типа, в котором капли жидкости оседают на стенке сепарационного стакана и образуют вращающийся слой жидкости, которая продавливается сквозь отверстие в стенке стакана, стекает в кольцевое пространство и выводится из устройства. Для минимизации вторичного уноса капель на стакан установлен тороидальный отсекаТЕЛЬ.

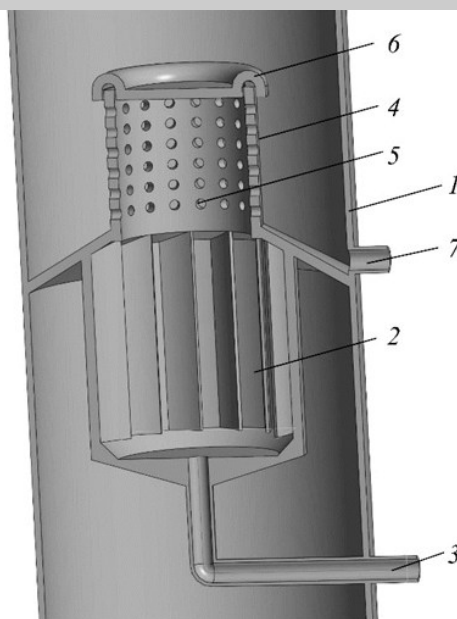


Рис. 1 – Сепарационное устройство с тангенциально-лопаточным завихрителем потока газа:
1 – цилиндрический корпус; 2 – тангенциально-лопаточный завихритель; 3 – патрубок ввода
жидкости; 4 – сепарационный стакан; 5 – отверстия; 6 – тороидальный отсекаТЕЛЬ;
7 – патрубок отвода жидкости

Fig. 1 – Separation device with a tangential-vane gas flow swirler:
1 – cylindrical housing; 2 – tangential-vane swirler; 3 – liquid inlet pipe; 4 – separation cup;
5 – holes; 6 – toroidal separator (baffle); 7 – liquid outlet pipe

В качестве исходных данных для расчета использованы физико-химические свойства компонентов трехфазной системы: воздушной среды (газовая фаза), воды (орошающая жидкость) и зерновой пыли (дисперсная фаза). Параметры газовой фазы приняты соответствующими воздуху при нормальных условиях. Характеристики дисперсной фазы определены на основе анализа фракционного состава пыли, образующейся при переработке зерна и производстве комбикормов, где преобладают частицы размером от 1 до 15 мкм. Плотность частиц пыли принята 1550 кг/м³. В качестве орошающей жидкости использована вода с плотностью 1000 кг/м³.

Методология исследования базировалась на разработке аналитических моделей, описывающих движение частиц в закрученном газовом потоке и процесс их захвата каплями орошающей жидкости. Расчет эффективности сепарации выполнялся отдельно для двух механизмов: центробежного и инерционного. Для оценки центробежной сепарации использовано уравнение равновесного радиуса движения капли, выведенное из баланса центробежной силы и силы аэродинамического сопротивления. Анализ инерционного осаждения проведен на основе уравнений массопереноса в цилиндрической системе координат с учетом взаимодействия частиц с вращающимся капельным слоем. При выводе расчетных зависимостей приняты следующие допущения: движение частицы в тангенциальном направлении происходит без проскальзывания относительно газового потока; толщина капельного слоя пренебрежимо мала по

сравнению с зоной поперечной сепарации; газовый поток движется через капельный слой в режиме идеального вытеснения; в условиях интенсивной крутки потока тангенциальная составляющая скорости капли преобладает над радиальной и осевой составляющими.

Условия моделирования определены исходя из типичных режимов работы аспирационных систем малых и средних предприятий АПК: расход газа фиксирован на уровне $G = 500$ кг/ч, диапазон расходов орошающей жидкости варьировался от $L = 21$ до 168 кг/ч, что соответствует соотношению расходов фаз L/G от 0,06 до 0,47. Геометрические параметры сепаратора (радиус рабочей зоны, высота, коэффициент крутки завихрителя $A = 0,8$) приняты постоянными для серии расчетов. Полученные расчетные зависимости эффективности сепарации при указанных параметрах приведены в следующем разделе.

Результаты и обсуждение. Для достижения поставленной цели выполнены расчеты эффективности центробежного и инерционного механизмов сепарации. Эффективность центробежной сепарации оценивалась на основе траектории движения частиц в закрученном газовом потоке в зоне поперечной сепарации устройства. В основу расчета положено допущение, что уносятся капли, имеющие равновесный радиус движения меньший, чем радиус их ввода в зону поперечной сепарации. Уравнение равновесного радиуса одиночной сферической капли r^* , движущейся в закрученном газовом потоке, выведено из условия баланса силы аэродинамического сопротивления и центробежной силы:

$$r^* = \frac{W_{\varphi,0}^2}{W_{r,0}\tau} = \frac{2\varepsilon_0^2 H}{\tau AR}, \quad (1)$$

где $W_{\varphi,0}$, $W_{r,0}$ – тангенциальная и радиальная скорости газа на периферии течения, м/с; ε_0 – коэффициент сохранения скорости на входе в устройство, определяется геометрией завихрителя, $\varepsilon_0 = W_{\varphi,0}/W_{\text{вх}} = 1$ для тангенциальных завихрителей; $W_{\text{вх}}$ – скорость газа в живом сечении завихрителя, м/с; R , H – радиус и высота рабочей зоны течения, м; $A = F_{\text{вх}}/(\pi R^2)$ – коэффициент крутки тангенциально-лопаточного завихрителя потока газа; τ – время релаксации частицы по Стоксу, рассчитываемое по формуле, с:

$$\tau = \frac{18\rho_z v_z}{\rho_c \delta_p^2}, \quad (2)$$

где ρ_z , ρ_c – плотности газа и капли жидкости, соответственно, кг/м³; v_z – кинематическая вязкость газа, м²/с; δ_p – диаметр частицы пыли, м.

Эффективность центробежного разделения определялась по формуле:

$$\eta_{\text{цб}} = \delta_p^2 / R^2. \quad (3)$$

Анализ инерционного осаждения частиц на каплях жидкости выполнен на основе уравнений массопереноса в цилиндрической системе координат, сопряженной с тангенциально-лопаточным завихрителем. В расчетной области выделен элементарный объем тороидальной формы с поперечными сторонами d_r и d_z (рис. 2). Количественное изменение массы дисперсной фазы dM в газовом потоке при его прохождении через данный объем описывается уравнением, м³/с:

$$dM = 2\pi r W_r \frac{dc_y}{dr} dr dz, \quad (4)$$

где W_r – радиальная скорость газа, м/с; c_y – концентрация дисперсной фазы в газовом потоке.

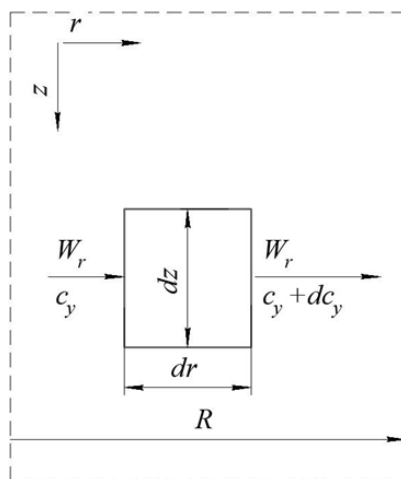


Рис. 2 – Расчетная схема
Fig. 2 – Calculation scheme

Концентрация дисперсной фазы определяется явлением захвата частиц каплями орошаемой жидкости и может быть записана в виде, м³/с:

$$dM = \eta_k v_k' c_y dF_k, \quad (5)$$

где η_k – эффективность захвата частиц одиночной каплей; dF_k – суммарная площадь миделева сечения капель в элементарном объеме, м²; v_k' – относительная скорость движения частицы, м/с.

Степень захвата одиночной каплей частиц дисперсной фазы рассчитывалась по эмпирической формуле [13], применяемой в практике расчета процесса мокрого пылеулавливания:

$$\eta_k = \frac{\text{Stk}}{\text{Stk} + 0,59L}, \quad (6)$$

где Stk – модифицированное число Стокса,

$$\text{Stk} = \frac{\rho_p \delta_p^2 v_k'}{18\rho_z v_z \delta_k};$$

L – параметр смачиваемости твердых частиц, $L \geq 1$.

Относительная скорость v_k' определялась как:

$$v_k' = \sqrt{(U_\varphi - V_\varphi)^2}, \quad (7)$$

где U_φ , V_φ – тангенциальные составляющие скорости частицы и капли, соответственно, м/с; $U_\varphi = W_{\varphi,0}$.

Суммарная площадь миделева сечения капель орошаемой жидкости dF_k связана с их массой в элементарном объеме:

$$dF_k = \frac{3}{2} \frac{dM_k}{\rho_c \delta_k}, \quad (8)$$

где dM_k – масса капель в элементарном объеме, рассчитываемая через среднemasсовую скорость жидкости $\tilde{V}_z$ и время движения t ,

$$dM_k = 2\pi \lambda t \tilde{V}_z r dr, \quad (9)$$

где $t = d_z/V_z$ – время, с; V_z – осевая скорость

капли в слое, м/с; $\tilde{V} \approx Lc/(2\pi Rbc)$ – скорость жидкости, м/с; bc – толщина капельного слоя, м; Lc – объемный расход жидкости в слое, м³/с; λ – коэффициент, учитывающий увеличение массы капель из-за их движения в тангенциальном направлении,

$$\lambda = \sqrt{1 + U_{\phi}^2 / U_r^2}.$$

На основе уравнений (4) и (5) было получено дифференциальное уравнение, описывающее динамику изменения концентрации частиц в газовом потоке по толщине капельного слоя:

$$dc_y / dr = Bc_y, \quad (10)$$

где коэффициент B находится по формуле:

$$B = \frac{3}{2} \frac{L}{G} \frac{\rho_c}{\rho_g} \frac{(1-\chi)\epsilon_0}{\chi A} \eta_k \frac{H}{b\delta_k} \sqrt{1 + \frac{4\epsilon_0^2 H^2}{R^2 A^2}} \frac{H}{z} \frac{L}{\rho_c}, \quad (11)$$

где χ – коэффициент проскальзывания; G – расход газа, кг/с.

Интегрирование уравнения (10) с начальными условиями $r = R$; $c_y = c_{y,0}$ позволяет получить зависимость для определения концентрации частиц в газе

$$c_y = c_{y,0} e^{-B(R-r)}. \quad (12)$$

Концентрация твердых частиц в газовом потоке на выходе из сепарационного устройства находится по формуле:

$$c_{y,вых} = c_{y,0} e^{-Bb_c}. \quad (13)$$

При дополнительном допущении полного перемешивания жидкой фазы в поперечном направлении, на основе уравнения материального баланса было определено количество дисперсной фазы, переходящее из газовой в жидкую фазу в элементарном слое высотой dz ,

$$dM = \frac{\rho_c}{\rho_g} \frac{L}{G} \frac{dc_x}{dz} dz. \quad (14)$$

С учетом условия неразрывности газового потока было получено следующее выражение:

$$\frac{dc_x}{dz} = \frac{G}{L} \frac{\rho_c}{\rho_g} \frac{c_y}{H} [1 - \exp(-Bb_c)]. \quad (15)$$

Интегрированием уравнения (15) при начальных условиях $z = z_0$; $c_x = c_{x,0}$ была найдена зависимость для концентрации частиц в жидкости по высоте капельного слоя:

$$c = c_{x,0} + \frac{G}{L} \frac{\rho_c}{\rho_g} \frac{c_y}{H} \int_{z_0}^H [1 - \exp(-B(R-r))] dz, \quad (16)$$

и для концентрации частиц в жидкости на выходе из вихревого устройства:

$$c_{x,вых} = c_{x,0} + \frac{G}{L} \frac{\rho_c}{\rho_g} \frac{c_y}{H} \int_{z_0}^H [1 - \exp(-Bb_c)] dz. \quad (17)$$

При оценке эффективности инерционной сепарации твердых частиц на каплях орошаемой жидкости необходимо найти долю дисперсной фазы, уносимой жидкостью, от исходного количества частиц в газе:

$$\eta_u = \frac{L}{G} \frac{\rho_c}{\rho_g} \frac{(c_{x,вых} - c_{x,0})}{c_{y,0}}, \quad (18)$$

и определено уравнение для ее расчета:

$$\eta_u = \int_{z_0}^H (1 - e^{-T}) dz, \quad (19)$$

$$\text{где } T = \frac{3}{2} \frac{L}{G} \frac{\rho_c}{\rho_g} \frac{(1-\chi)\epsilon_0}{\chi A} \eta_k \frac{H}{\delta_k} \sqrt{1 + \frac{4\epsilon_0^2 H^2}{R^2 A^2}} \frac{H}{z}.$$

Как и ожидалось, эффективность инерционной сепарации не зависит от начальной концентрации частиц в газовом потоке. Более существенным является наблюдение, что степень сепарации не коррелирует с толщиной вращающегося капельного слоя. Это явление объясняется следующим фактом, что количество улавливаемой дисперсной фазы определяется не геометрическими параметрами слоя, а интегральными характеристиками капельной среды: суммарным количеством капель, их суммарной поверхностью, которые, в свою очередь, зависят от трех ключевых факторов: расхода орошающей жидкости, дисперсного состава капель и их кинематических характеристик.

Уравнение (19) строго справедливо только для монофракционного состава капель в слое; при полидисперсном факеле используется средний объемно-поверхностный диаметр.

На основе полученных в результате расчета данных построены зависимости изменения эффективности центробежной сепарации и инерционного осаждения частиц при разном расходе жидкости.

Физический механизм выбора расхода жидкости как детерминирующего параметра на эффективность центробежной сепарации связан с тем, что подсаживаемая жидкость увеличивает потребление энергии вращательного потока газа. При постоянном расходе газа G увеличение массовой доли жидкости L относительно газа означает возрастание силы трения между фазами, что приводит к диссипации энергии вращения и снижению тангенциальной скорости газового потока. Одновременно, больший расход жидкости создает более плотный слой капель на периферии устройства, увеличивая вероятность столкновения мелких частиц с каплями (инерционный механизм). Таким образом, параметр L/G является критическим оптимизационным параметром, требующим компромисса между двумя конкурирующими механизмами разделения фаз.

Расчет фракционной эффективности центробежной сепарации по уравнению (3) показал (рис. 3), что центробежные силы обеспечивают практически полное отделение частиц размером свыше 10 мкм. С увеличением подачи орошающей жидкости происходит снижение крутки газового потока, что в свою очередь приводит к

снижению эффективности центробежной сепарации. Например, при $L/G = 0,12$ для частиц диаметром 10 мкм величина $\eta_{цб}$

достигает 80%, тогда как при $L/G = 0,23$ она падает до 50%, а при $L/G = 0,47$ составляет всего 18%.

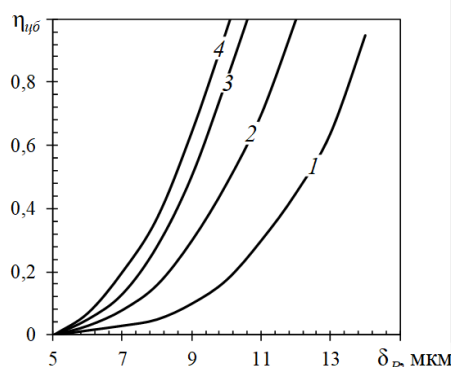


Рис. 3 – Зависимость эффективности центробежной сепарации от соотношения нагрузок по фазам L/G : 1 – 0,47; 2 – 0,23; 3 – 0,12; 4 – 0,06

Fig. 3 – Dependence of centrifugal separation efficiency on the liquid-to-gas phase load ratio (L/G): 1 – 0.47; 2 – 0.23; 3 – 0.12; 4 – 0.06

Расчеты по уравнению (19) при расходе газа $G = 500$ кг/ч и коэффициенте крутки $A = 0,8$ показали (рис. 4), что фракционная эффективность инерционной сепарации существенно зависит от расхода орошающей жидкости L . Эффективность инерционной сепарации η_i демонстрирует положительную корреляцию с увеличением диаметра частиц, асимптотически стремясь к предельным значениям, величина которых возрастает при повышении расхода орошающей жидкости. Анализ полученных зависимостей свидетельствует о том, что для частиц диаметром свыше 4 мкм эффективность инерционного осаждения стабилизируется, достигая практически постоянных значений. Так, при расходе орошаемой жидкости $L = 21$ кг/ч максимальная эффективность улавливания не превышает 56%, тогда как увеличение расхода до 168 кг/ч приводит к ее росту до 94%. Отсутствие 100%-эффективности инерционного осаждения даже для крупных частиц обусловлено неполным перекрытием поперечного сечения сепарационного устройства каплями. При низких удельных расходах жидкости наблюдается уменьшение плотности капель

во вращающемся слое, что приводит к проскоку частиц и снижению эффективности сепарации запыленного потока газа. С увеличением расхода газа значение η_i снижается, так как время движения частиц в капельном слое сокращается.

Общая эффективность сепарации с учетом обоих механизмов может быть оценена предположением статистической независимости центробежного и инерционного эффектов. Таким образом, может быть применена широко используемая в практике пылеулавливания формула произведения вероятностей проскока частиц [14].

$$\eta_{\phi} = 1 - (1 - \eta_u)(1 - \eta_{цб}). \quad (20)$$

В рассматриваемом случае такой подход корректен при условии пренебрежения влиянием центробежного ускорения на движение частиц, что было учтено при выводе формулы (19). При известных значениях фракционной эффективности сепарации дисперсной фазы общая степень очистки газового потока может быть рассчитана методом весового суммирования фракционных эффективностей [14]:

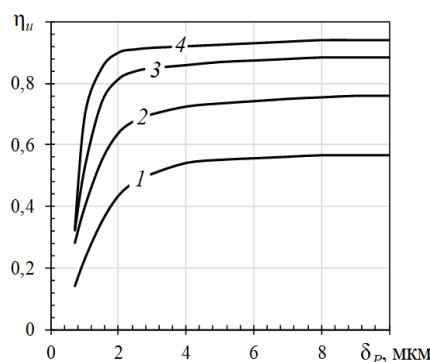


Рис. 4 – Зависимость эффективности инерционного осаждения частиц от нагрузки по жидкой фазе L , кг/ч: 1 – 21; 2 – 42; 3 – 84; 4 – 168; $G = 500$ кг/ч; $A = 0,8$; $\delta_k = 380$ мкм

Fig. 4 – Dependence of inertial particle deposition efficiency on the liquid phase load (L , kg/h): 1 – 21; 2 – 42; 3 – 84; 4 – 168; $G = 500$ kg/h; $A = 0.8$; $\delta_k = 380$ μ m

Таким образом, проведенный анализ выявил противоречивое влияние расхода орошающей жидкости L на общий процесс сепарации. С одной стороны, рост нагрузки по жидкой фазе подавляет центробежный механизм, снижая эффективность $\eta_{цб}$ для частиц диаметром ~ 10 мкм с 80% до 18%. С другой стороны, тот же рост L значительно усиливает инерционный механизм, повышая η_i для тех же частиц до 94%. Это указывает на наличие оптимального диапазона соотношения L/G , при котором суммарная эффективность сепарации (рассчитанная по формуле (20)) будет максимальной. Данный оптимум, по-видимому, смещен в сторону более высоких значений L/G , так как падение эффективности центробежной сепарации компенсируется резким ростом эффективности инерционного механизма осаждения частиц.

На основе проведенного анализа влияния режимных параметров на эффективность сепарации были сформулированы рекомендации по применению исследуемого устройства для конкретных технологических процессов агропромышленного комплекса.

Для зерносушилок и элеваторных комплексов, где преобладает крупнодисперсная пыль (свыше 10 мкм) при высоких температурах выбросов, рекомендуется работа с минимальным орошением при $L/G = 0,06-0,12$. Данные показывают, что в этом диапазоне эффективность центробежной сепарации для частиц 10 мкм максимальна и составляет 80–96%. Увеличение расхода жидкости нецелесообразно, так как оно снижает крутку потока и эффективность очистки от крупных фракций.

На комбикормовых заводах, где в процессах дробления, смешивания и гранулирования образуется мелкодисперсная пыль (5–10 мкм) с высоким содержанием белковых и минеральных компонентов, оптимальным является режим $L/G = 0,23-0,35$. Расчеты показывают, что суммарная эффективность улавливания частиц 5 мкм достигает 90–92%, что невозможно реализовать в сухих циклонах, где эффективность для данной фракции не превышает 30%. Использование мокрого метода также позволяет возвращать уловленную пыль в производство в виде влажной кормовой добавки, что повышает экономическую эффективность процесса.

Для мукомольного производства, характеризующегося высокой дисперсностью пыли (до 70% частиц менее 5 мкм) и повышенными требованиями к взрывобезопасности, рекомендуется работа при $L/G \geq 0,35$. При расходе жидкости 168 кг/ч эффективность инерционного осаждения даже для частиц 4 мкм достигает 92%, а для 10 мкм — 94%.

Это обеспечивает надежную санитарную очистку и взрывобезопасность процесса за счет смачивания частиц.

Выводы. Установлено, что эффективность центробежной сепарации в разработанном устройстве существенно зависит от соотношения нагрузок по фазам L/G . Увеличение расхода орошающей жидкости снижает крутку газового потока, что приводит к уменьшению степени очистки, особенно для частиц диаметром менее 10 мкм.

Доказано, что эффективность инерционной сепарации определяется главным образом расходом орошающей жидкости и дисперсным составом капель, тогда как геометрические параметры капельного слоя, такие как толщина и радиус, оказывают пренебрежимо малое влияние на процесс. Наибольшая степень очистки наблюдается для частиц пыли с диаметром, превышающим 4 мкм.

Показано, что комбинация центробежного и инерционного механизмов позволяет достичь высокой общей эффективности сепарации, что открывает возможности для оптимизации конструкции вихревых устройств без увеличения их габаритов.

Выявлен противоречивый характер влияния параметра L/G и на основе этого предложен подход к выбору режима работы: для очистки газа от крупных частиц (> 10 мкм) целесообразно использовать низкие соотношения L/G ($\leq 0,12$) для максимизации центробежной сепарации; для очистки от мелкодисперсной пыли (< 4 мкм) необходимо увеличивать L ($L/G \geq 0,23$) для интенсификации инерционного механизма; при обработке полидисперсной пыли рекомендуется выбирать промежуточные значения L/G в диапазоне 0,15–0,20.

Обосновано, что предложенное газожидкостное сепарационное устройство является перспективным для модернизации систем аспирации предприятий АПК (элеваторы, комбикормовые заводы и др.) благодаря компактности конструкции, возможности возврата уловленного продукта в технологический цикл и повышенной взрывобезопасности по сравнению с сухими методами очистки.

Сведения о финансировании. Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ (Соглашение №10/2025-ПД-КНИТУ от 22.12.2025).

Литература

1. Иванов А.Г., Ширококов В.И., Калимуллин М.Н. Зависимость частоты вращения лопастей мешалки мокрого пылеуловителя от плотности жидкости // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17. № 3(67). С. 77–83. doi: 10.12737/2073-0462-2022-81-87.
2. Tian C., Yang Z., Zhang L. A review of grain dust explosions: Prevention and control // Results in Engineering. 2025. Vol. 26. Article 105483. doi: 10.1016/j.rineng.2025.105483.

3. Zhao J.P., Tang G.F., Wang Y.C., Han Y. Explosive property and combustion kinetics of grain dust with different particle sizes // *Heliyon*. 2020. Vol. 6. Issue 3. Article e03457. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03457.
4. Dziubak T., Dziubak S. A study on the effect of inlet air pollution on the engine component wear and operation // *Energies*. 2022. Vol. 15. Article 1182. doi: 10.3390/en15031182.
5. Небытов В.Г. Воздействие пылевого фактора на условия труда работников АПК // *Охрана и экономика труда*. 2015. № 2(19). С. 89–93.
6. Рудыка Е.А., Батурина Е.В. Анализ пылеочистного оборудования, используемого при производстве растворимых порошков // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2016. № 2(68). С. 193–196. doi: 10.20914/2310-1202-2016-2-193-196.
7. Dziubak S., Dziubak T. Experimental study of an axial flow cyclone with ongoing dust removal from a settling tank // *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 2025. Vol. 209. Article 110167. doi: 10.1016/j.cep.2025.110167.
8. Красовицкий Ю.В., Федорова М.Н, Архангельская Е.В., Логинов А.В. Особенности фильтрования технологических газов и аспирационных выбросов зернистыми слоями в пищевой технологии // *Вестник Воронежской государственной технологической академии*. 2010. № 1(43). С. 83–86.
9. Панова О.Д., Красовицкий Ю.В., Панов С.Ю. Фильтр с динамической регенерацией для улавливания и утилизации пылевых выбросов при хранении и переработке зерна // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2007. № 8. С. 67–69.
10. Скорик Т.А., Глазунова Е.К., Галкина Н.И. Оценка эффективности работы мокрых пылеулавливающих аппаратов // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 2(49). С. 132–140.
11. Харьков В.В., Николаев А.Н. Инженерная методика расчета вихревой камеры со взвешенным капельным слоем // *Химическая промышленность сегодня*. 2017. № 1. С. 16–21.
12. Николаев А.Н., Нуртдинов Н.М., Харьков В.В. Эффективность инерционного осаждения частиц на каплях жидкости в полых вихревых аппаратах при очистке выбросов пищевых производств // *Вестник технологического университета*. 2015. Т. 18. № 3. С. 294–296.
13. Литвинов А.Т. Об оценке эффекта захвата крупными частицами или каплями жидкости мелких частиц и о влиянии гидрофильности частиц на коэффициент захвата // *Инженерно-физический журнал*. 1969. Т. 16. № 6. С. 1052–1061.
14. Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрябин Г.М. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. Л.: Химия, 1982. 256 с.

References

1. Ivanov AG, Shirobokov VI, Kalimullin MN. [Dependence of the rotation frequency of the wet dust collector mixer blades on the liquid density]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022; Vol.17. 3 (67). 77-83 p. doi: 10.12737/2073-0462-2022-81-87.
2. Tian C, Yang Z, Zhang L. A review of grain dust explosions: prevention and control. *Results in Engineering*. 2025; Vol.26. Article 105483. doi: 10.1016/j.rineng.2025.105483.
3. Zhao JP, Tang GF, Wang YC, Han Y. Explosive property and combustion kinetics of grain dust with different particle sizes. *Heliyon*. 2020; Vol.6. Issue 3. Article e03457. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03457.
4. Dziubak T, Dziubak S. A study on the effect of inlet air pollution on the engine component wear and operation. *Energies*. 2022; Vol.15. Article 1182. doi: 10.3390/en15031182.
5. Nebytov VG. [Impact of the dust factor on working conditions of workers in the agro-industrial complex]. *Okhrana i ekonomika truda*. 2015; 2(19). 89-93 p.
6. Rudyka EA, Baturina EV. [Analysis of dust cleaning equipment used in the production of soluble powders]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy*. 2016; 2(68). 193-196 p. doi: 10.20914/2310-1202-2016-2-193-196.
7. Dziubak S, Dziubak T. Experimental study of an axial flow cyclone with ongoing dust removal from a settling tank. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 2025; Vol.209. Article 110167. doi: 10.1016/j.cep.2025.110167.
8. Krasovitskiy YuV, Fedorova MN, Arkhangelskaya EV, Loginov AV. [Features of filtration of process gases and aspiration emissions by granular layers in food technology]. *Vestnik Voronezhskoy gosudarstvennoy tekhnologicheskoy akademii*. 2010; 1(43). 83-86 p.
9. Panova OD, Krasovitskiy YuV, Panov SYu. [Filter with dynamic regeneration for capturing and recycling dust emissions during grain storage and processing]. *Khranenie i pererabotka selkhozsyrya*. 2007; 8. 67-69 p.
10. Skorik TA, Glazunova EK, Galkina NI. [Evaluation of wet dust collecting devices efficiency]. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2018; 2(49). 132-140 p.
11. Kharkov VV, Nikolaev AN. [Engineering methodology for calculating a vortex chamber with a suspended droplet layer]. *Khimicheskaya promyshlennost segodnya*. 2017; 1. 16-21 p.
12. Nikolaev AN, Nurtidinov NM, Kharkov VV. [Efficiency of inertial sedimentation of particles on liquid droplets in hollow vortex apparatus for cleaning food production emissions]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2015; Vol.18. 3. 294-296 p.
13. Litvinov AT. [On assessing the effect of capture small particles by large particles or liquid droplets and the influence of particle hydrophilicity on the capture efficiency]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. 1969; Vol.16. 6. 1052-1061 p.
14. Kouzov PA, Malgin AD, Skryabin GM. [Cleaning dust from gases and air in the chemical industry]. *Leninograd: Khimiya*. 1982; 256 p.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Харьков Виталий Викторович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры оборудования пищевых производств Казанского национального исследовательского технологического университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, улица Карла Маркса, 68), e-mail: v.v.kharkov@gmail.com, ORCID 0000-0002-8219-7323

Николаев Андрей Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой оборудования пищевых производств Казанского национального исследовательского технологического университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, улица Карла Маркса, 68), e-mail: andr_nik_nik@rambler.ru, ORCID 0000-0002-0714-2613

Зиганшин Булат Гусманович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машин и оборудования в агробизнесе Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), e-mail: zigan66@mail.ru, ORCID 0000-0003-2129-2631

Вклад авторов:

В. В. Харьков – концепция и постановка исследования, разработка методологии, проведение исследований и экспериментов, формальный анализ данных, визуализация результатов, подготовка первоначального варианта рукописи, администрирование проекта;

А. Н. Николаев – разработка и уточнение методологии исследования, валидация и проверка воспроизводимости результатов, обеспечение ресурсов и оборудования, научное руководство, критический пересмотр текста и научное редактирование;

Б. Г. Зиганшин – формальный анализ и интерпретация результатов, проверка корректности расчётов и выводов, критический пересмотр и литературное редактирование рукописи.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 03.12.2025; одобрена после рецензирования 24.02.2026; принята к публикации 01.04.2026.

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

Authors:

Kharkov Vitaliy Viktorovich – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Food Production Equipment Kazan National Research Technological University (68 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: v.v.kharkov@gmail.com, ORCID 0000-0002-8219-7323

Nikolaev Andrey Nikolaevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Food Production Equipment Kazan National Research Technological University (68 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: andr_nik_nik@rambler.ru, ORCID 0000-0002-0714-2613

Ziganshin Bulat Gusmanovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Machinery and Equipment in Agribusiness Department Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: zigan66@mail.ru, ORCID 0000-0003-2129-2631

Contribution of the authors:

V.V. Kharkov – Research concept and design, Methodology development, Conducting research and experiments, Formal data analysis, Results visualization, Drafting the manuscript, Project administration;

A.N. Nikolaev – Methodology development and refinement, Validation and verification of result reproducibility, Provision of resources and equipment, Scientific supervision, Critical review of the text and scientific editing;

B.G. Ziganshin – Formal analysis and interpretation of results, Verification of calculation accuracy and conclusions, Critical review and literary editing of the manuscript.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 03.12.2025; revised 24.02.2026; accepted 01.04.2026.



ИНДЕКС АГРАРНО-СОЦИАЛЬНОГО ДИСБАЛАНСА: МЕТОДИКА ОЦЕНКИ И ТИПОЛОГИЯ СЕЛЬСКИХ ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ БУРЯТИЯ)

© 2026 Баженова В. С., Малушко Д. Ж., Шобдоева Н. В., Полозова Т. В., Ванчикова Е. Н. ✉

Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова

(г. Улан-Удэ, Российская Федерация)

✉ evanch@mail.ru

Реферат. Устойчивое развитие сельских территорий сдерживается дисбалансом между экономической эффективностью агропромышленного комплекса и качеством жизни населения, что провоцирует депопуляцию даже при растущем производстве. В регионах с резко континентальным климатом и традиционной аграрной специализацией эта проблема приобретает особую остроту. В Республике Бурятия, где 75% валовой продукции сельского хозяйства приходится на животноводство, а миграционный отток сельских жителей остается устойчивым трендом, выполнена количественная оценка данного дисбаланса и типологизация муниципальных районов. В основу работы положен авторский Индекс аграрно-социального дисбаланса (ИАСД), агрегирующий показатели продуктивности сельского хозяйства, природно-климатические условия и качество жизни (обеспеченность социальной инфраструктурой, развитие транспортной и цифровой связи, уровень доходов и диверсификацию занятости). Расчет индекса для сельских муниципальных образований региона позволил выделить три типа территорий: 1) «Эффективность без перспектив» ($\text{ИАСД} > 1,2$) – районы с высокой товарностью агросектора и низким качеством жизни, что коррелирует с максимальной миграционной убылью; 2) «Сбалансированное, но уязвимое развитие» ($0,8 \leq \text{ИАСД} \leq 1,2$) – территории с относительным равновесием, неустойчивым к внешним шокам; 3) «Комфорт без развития» ($\text{ИАСД} < 0,8$) – характеризуется развитой социальной сферой при слабости аграрного сектора. Для каждого типа определены приоритетные направления политики: в первом – стимулирование перерабатывающих производств и развитие цифровой инфраструктуры; во втором – диверсификация экономики и поддержка кооперации; в третьем – развитие туризма и создание условий для удаленной занятости. Результаты доказывают необходимость адресного подхода, учитывающего не отраслевую эффективность, а баланс экономических и социальных факторов.

Ключевые слова: сельское хозяйство, социальная инфраструктура, сельские территории, дисбаланс, депопуляция, типология, Республика Бурятия.

Для цитирования: Индекс аграрно-социального дисбаланса: методика оценки и типология сельских территорий (на примере Республики Бурятия) / В.С. Баженова, Д.Ж. Малушко, Н.В. Шобдоева и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 119-127. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-119-127

AGRARIAN-SOCIAL IMBALANCE INDEX: ASSESSMENT METHODOLOGY AND TYPOLOGY OF RURAL AREAS (CASE STUDY OF THE REPUBLIC OF BURYATIA)

© 2026 Bazhenova V. S., Malushko D. Zh., Shobdоеva N. V., Polozova T. V., Vanchikova E. N. ✉

Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov

(Ulan-Ude, Russian Federation)

✉ evanch@mail.ru

Abstract. Sustainable development of rural areas is constrained by an imbalance between the economic efficiency of agro-industrial complex and the population's quality of life, which triggers depopulation even as production increases. This problem is particularly acute in regions with a sharply continental climate and traditional agricultural specialization. In the Republic of Buryatia, where livestock farming accounts for 75% of gross agricultural output and rural outmigration remains a persistent trend, a quantitative assessment of this imbalance and a typology of municipal districts were conducted. The study is based on the author's Index of Agrarian-Social Imbalance (IASI), which aggregates indicators of agricultural productivity, natural and climatic conditions and quality of life (provision of social infrastructure, development of transport and digital communications, income level and employment diversification). Calculation of the index for rural municipalities of the region allowed us to distinguish three types of territories: 1) "Efficiency without prospects" ($\text{IASI} > 1.2$) - districts with high marketability of the agricultural sector and low quality of life, which correlates with maximum migration loss; 2) "Balanced but vulnerable development" ($0.8 \leq \text{IASI} \leq 1.2$) - territories with relative equilibrium, unstable to external shocks; 3) "Comfort without development" ($\text{IASI} < 0.8$) - characterized by a developed social sphere with a weak agricultural sector. Priority policy areas have been defined for each type: the first one - stimulation of processing industries and development of digital infrastructure; the second focuses on economic diversification and support for cooperation; the third focuses on tourism

development and creation of conditions for remote employment. The results demonstrate the need for a targeted approach that considers not sectoral efficiency, but the balance of economic and social factors.

Key words: agriculture, social infrastructure, rural areas, imbalance, depopulation, typology, Republic of Buryatia.

For citation: Bazhenova VS, Malushko DZh, Shobdoeva NV, et al. [Agrarian-social imbalance index: assessment methodology and typology of rural areas (case study of the Republic of Buryatia)]. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2026; Vol. 21. 1(81). 119-127 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-119-127

Введение. В современных условиях глобализации и урбанизации одной из ключевых проблем для многих регионов мира, включая Российскую Федерацию, становится устойчивое развитие сельских территорий. Ключевая проблема устойчивого развития сельских территорий во второй половине XX – начале XXI века заключается в нарушении предполагавшейся прямой связи между ростом агропромышленного комплекса и социальным благополучием села. Несмотря на устойчивый рост производительности труда и объемов производства в сельском хозяйстве, что в теории должно было создать ресурсную базу для развития социальной инфраструктуры и закрепления населения, на практике сохраняется устойчивая тенденция к депопуляции. Классические модели, предполагающие, что экономический успех аграрного сектора автоматически ведет к улучшению качества жизни и закреплению населения на селе, на практике оказываются несостоятельными [1, 2, 3]. Это обуславливает необходимость поиска новых, более комплексных подходов к диагностике проблем и выработке адресных мер региональной политики.

Особую остроту эти вызовы приобретают в регионах со сложными природно-климатическими условиями и низкой плотностью населения, к которым относится Республика Бурятия. Расположенная в зоне резко континентального климата и рискованного земледелия, Бурятия демонстрирует высокую зависимость аграрного сектора от климатических колебаний. При этом внутри республики существует значительная дифференциация муниципальных районов как по уровню развития сельского хозяйства, так и по обеспеченности социальной инфраструктурой. Традиционный отраслевой анализ не позволяет в полной мере выявить и измерить дисбаланс между экономической эффективностью сельского хозяйства и социальной привлекательностью территории, являющийся, по нашему предположению, ключевым драйвером миграционного оттока [4].

Вопросы развития сельских территорий и

сельского хозяйства нашли отражение в трудах многих отечественных и зарубежных ученых. Анализ отечественных и зарубежных работ показывает, что взаимосвязь между инфраструктурой, сельским хозяйством и миграцией сложнее модели «лучше условия – меньше отток».

1. Мигранты как агенты изменений. Исследование, проведенное в Камеруне [5], показало, что внутренние мигранты могут становиться катализатором перемен в сельском хозяйстве принимающих регионов. Они приносят с собой новые знания, технологии и методы ведения хозяйства (например, переход от экстенсивного земледелия к интенсивному овощеводству), что ведет к росту производительности. Это означает, что сам факт миграции может модернизировать аграрный сектор, сокращая потребность в ручном труде, что частично объясняет, почему рост производства может сопровождаться сокращением занятости.

2. Социальная инфраструктура как система. Отдельные исследователи подчеркивают, что социальная инфраструктура села – это не просто набор объектов, а сложная система, на которую влияет множество факторов: от аграрной политики и финансового обеспечения до природных условий и системы расселения. Ее развитие напрямую связывают с устойчивым развитием сельских территорий и продовольственной безопасностью [4, 6, 7].

3. Институциональный подход. Также предлагается рассматривать социальную инфраструктуру через призму институтов – правил и организаций, которые координируют экономическую деятельность. Создание территориальных кластеров и государственно-частных партнерств, например, для обучения кадров и адаптации молодежи, рассматривается как способ предотвратить отток населения [7, 8, 9].

Следующие исследования и методологические разработки ярко демонстрируют интегральный подход, объединяющий экономические, социальные и другие компоненты развития села (табл. 1).

Таблица 1 – Существующие подходы/концепции к развитию сельских территорий
Table 1 – Existing approaches/concepts for the development of rural areas

Подход / Концепция	Ключевая характеристика
Территориально-системный подход	Рассмотрение села как целостной социально-экономической системы, где взаимосвязаны население, производство и природа [10, 11]
Социо-эколого-экономическая модель	Балансировка трех компонентов: экономической эффективности, социального благополучия и экологической стабильности [12, 13]
Концепция сбалансированности	Акцент на пропорциональности, согласованности и гармоничном соотношении элементов системы для минимизации дисбалансов [14, 15]

На государственном уровне также закреплён комплексный взгляд на проблему. «Стратегия устойчивого развития сельских территорий Российской Федерации на период до 2030 года» определяет такое развитие как многоаспектный процесс, включающий стабильное социально-экономическое развитие, рост объемов сельхозпроизводства, повышение занятости и уровня жизни населения. Этот документ задает рамки для программ и мониторингов, учитывающих взаимосвязь всех компонентов.

Дисбаланс между экономической эффективностью аграрного сектора (ростом производительности) и уровнем развития социальной инфраструктуры и неаграрных экономических возможностей является системообразующим фактором, определяющим дифференциацию муниципальных районов Бурятии по интенсивности миграционного оттока и социально-экономическому благополучию. Поэтому, целью данного исследования является разработка интегрального показателя для оценки взаимосвязи развития социальной инфраструктуры и эффективности аграрного сектора и его апробация на примере муниципальных районов Республики Бурятия для последующей выработки типологии территорий и адресных рекомендаций.

Условия, материалы и методы. В процессе исследования были использованы официальные данные Бурятстата, отчеты Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Бурятия, а также агроклиматические зонирования территории республики.

Для количественной оценки взаимосвязи между развитием агропромышленного комплекса и социальной инфраструктуры муниципальных районов Республики Бурятия была разработана оригинальная методика расчета Индекса аграрно-социального дисбаланса (ИАСД).

Индекс основан на гипотезе, что движущей силой миграционного оттока является не абсолютный уровень развития агросферы или социальной инфраструктуры, а дисбаланс между экономической эффективностью сельского хозяйства и качеством жизни на селе. Высокая эффективность сельского хозяйства при низком качестве жизни создает «ловушку развития», когда экономические успехи не транслируются в социальное благополучие, ускоряя отток населения.

Индекс аграрно-социального дисбаланса (ИАСД) предлагается рассчитывать по следующей формуле:

$$\text{ИАСД} = (\text{КАТ} \times \text{КМ}) / \text{ИКЖ} \quad (1)$$

где КАТ – коэффициент аграрной трансформации, отражающий экономическую эффективность и технологический уровень сельского хозяйства;

КМ – климатический мультипликатор, корректирующий оценку эффективности с учетом природных рисков;

ИКЖ – индекс качества жизни и возможностей, характеризующий уровень развития социальной инфраструктуры и неаграрных экономических перспектив.

При этом коэффициент аграрной трансформации (КАТ) отражает степень интенсивности и технологической трансформации аграрного сектора и рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{КАТ} = (\text{ВПсх} / \text{ЧЗсх}) \times (\text{ДВП} / 100) \quad (2)$$

где ВПсх – валовая продукция сельского хозяйства района в стоимостном выражении (млн руб.);

ЧЗсх – численность занятых в сельском хозяйстве района (чел.);

ДВП – доля товарной продукции (например, товарное мясо, молоко, зерно) в общей структуре ВПсх (%).

Индекс качества жизни и возможностей (ИКЖ) – комплексный показатель, агрегирующий несколько ключевых аспектов социального благополучия и экономических альтернатив, рассчитывается как среднее арифметическое от четырех нормализованных субиндексов (каждый от 0 до 1):

- субиндекс обеспеченности объектами социнфраструктуры (I_1), рассчитывается на основе обеспеченности населения врачами, местами в школах и детсадах, доступом к библиотекам и клубам;

- субиндекс развития транспортной и цифровой инфраструктуры (I_2), учитывает плотность дорог с твердым покрытием, доступность подвижной связи и широкополосного интернета;

- субиндекс уровня доходов (I_3), рассчитывается на основе соотношения среднемесячной номинальной начисленной заработной платы в районе к среднереспубликанскому значению;

- субиндекс диверсификации экономики (I_4), рассчитывается как доля занятых в сельском хозяйстве от общей численности занятых и отражает наличие альтернативных возможностей для трудоустройства.

Для приведения разнородных показателей к единой шкале от 0 до 1 использовался метод линейного масштабирования (min-max нормализация). Каждый исходный показатель (X) для муниципального района преобразовывался в субиндекс (I) по формуле: $I = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$, где $X_{\min}$ и $X_{\max}$ – минимальное и максимальное значения показателя по всем исследуемым районам. Это позволяет унифицировать вклад каждого фактора в интегральный индекс.

Климатический мультипликатор (КМ) вводится для корректного сравнения районов с разными природными условиями. Он понижает оценку эффективности для районов с благоприятными условиями и повышает – для районов с суровым климатом, где достижение высокой продуктивности требует больших усилий. Предполагается следующая шкала значений КМ:

- 1,2 – районы с наиболее благоприятными условиями (например, южные районы с умеренными осадками);

- 1,0 – районы со средними условиями;

- 0,8 – районы с неблагоприятными и рискованными условиями (северные, высокогорные районы, зоны частых засух).

Результаты и обсуждение. В Республике Бурятия в последнее десятилетие наблюдается устойчивый рост валовой продукции сельского хозяйства, который обеспечивается не за счет увеличения численности занятых, а благодаря интенсификации производства, внедрению технологий и, возможно, концентрации активов. Доля занятых в сельском хозяйстве республики неуклонно снижается, что соответствует глобальной модели. При этом, валовой выпуск сельхозпродукции на душу населения или на одного занятого существенно различается по районам. Так, районы с развитым товарным животноводством (например, Мухоршибирский) показывают значительно более высокие показатели экономической эффективности, чем районы, ориентированные на подсобные и личные хозяйства. Эффективность аграрного сектора многих муниципалитетов остается критически зависимой от различных форм государственных субсидий и дотаций, что делает ее уязвимой к изменениям в бюджетной политике.

Социальная сфера сельских территорий Бурятии характеризуется рядом системных проблем, усиливающих дисбаланс. Сохраняется проблема шаговой доступности объектов первой необходимости (фельдшерско-акушерских пунктов, школ, детских садов) в малых и удаленных населенных пунктах. Процессы оптимизации сети социальных учреждений, хотя и экономически обоснованы, зачастую ведут к дальнейшему ухудшению качества жизни. Низкая плотность и качество автомобильных дорог с твердым покрытием в большинстве районов, особенно в межселенной местности, являются серьезным барьером для развития. Неравномерное развитие сотовой связи и широкополосного интернета ограничивает доступ сельских жителей к дистанционному образованию, телемедицине и удаленной работе, сужая спектр неаграрных экономических возможностей. Уровень денежных доходов населения в сельской местности, как правило, ниже среднереспубликанского показателя. Экономика многих районов моноспециализирована, что создает мощный выталкивающий фактор для экономического активного населения.

Проведенный анализ подтверждает наличие в Республике Бурятия ярко выраженной внутрирегиональной дифференциации по уровню развития сельского хозяйства и социальной инфраструктуры. Сельское хозяйство республики, несмотря на устойчивую животноводческую специализацию (около 75% валовой продукции), демонстрирует значительную межрайонную разницу в эффективности:

в 2024 году инвестиции в экономику региона сократились на 35%, а валовой сбор зерна к 2025 году ожидается на 25% ниже. Социальная сфера также характеризуется глубоким неравенством: в 2024 году разрыв в доходах между 10% самых богатых и 10% самых бедных жителей достиг 12,3 раз, а индекс Джини, измеряющий неравенство, вырос до 0,379. Острую проблему представляет кадровый дефицит в ключевых отраслях, где на одну вакансию врача приходится лишь 1,2 резюме при норме в 4-8. Существующие статистические показатели, рассматриваемые по отдельности, не позволяют количественно оценить взаимосвязь между этими двумя сферами и выявить территории с наибольшим дисбалансом.

Республика Бурятия, обладая значительным природно-ресурсным и аграрным потенциалом, в то же время сталкивается с классическими вызовами депопуляции сельских территорий, которые усугубляются ее особым географическим положением и природоохранным статусом. Ключевые особенности, влияющие на дисбаланс:

1. Природоохранный режим. Значительная часть территории республики (включая центральную экологическую зону) относится к Байкальской природной территории, что накладывает строгие ограничения на хозяйственную деятельность, включая ведение сельского хозяйства. Это создает дополнительный структурный фактор, влияющий на экономические возможности как сельского хозяйства, так и на развитие неаграрных секторов.

2. Структура сельского хозяйства. Сельское хозяйство республики имеет ярко выраженную животноводческую специализацию, на которую приходится около 75% валовой продукции сельского хозяйства. Это определяет высокую зависимость от состояния кормовой базы, которая, в свою очередь, уязвима к климатическим колебаниям. Растениеводство ориентировано в основном на производство кормов и имеет ограниченный характер в силу природных условий.

3. Пространственная дифференциация. Муниципальные районы Бурятии сильно различаются по своим агроклиматическим и экономическим потенциалам. Условно можно выделить:

- Южные и центральные районы (например, Мухоршибирский, Тарбагатайский, Иволгинский), имеющие относительно благоприятные условия для ведения сельского хозяйства, высокую плотность населения, лучше развитую инфраструктуру;

- Северо-западные районы (Баунтовский, Эвенкийский, Окинский), для которых характерны экстремальные природные условия, очаговый характер расселения, слабо развитая транспортная и социальная сеть, преобладание традиционных промыслов.

4. Демографический тренд. Несмотря на

некоторую стабилизацию в последние годы, республика в целом сохраняет отрицательное сальдо миграции, наиболее выраженное именно в сельской местности. Трудоспособное население мигрирует в г. Улан-Удэ и в другие регионы России в поисках более высоких доходов и качественного образования.

На основе рассчитанных значений индекса аграрно-социального дисбаланса все муниципальные районы Республики Бурятия были классифицированы на три кластера (табл. 2). При интерпретации значений индекса мы исходили из следующих предположений:

- ИАСД > 1 – свидетельствует о наличии дисбаланса в сторону аграрной эффективности, экономический потенциал сельского хозяйства опережает социальное развитие территории («Эффективность без перспектив»);

- ИАСД ≈ 1 – указывает на сбалансированное развитие или сопоставимые темпы роста обоих компонентов;

- ИАСД < 1 – отражает дисбаланс в сторону социальной инфраструктуры при низкой эффективности сельского хозяйства («Комфорт без развития»).

Таблица 2 – Типология муниципальных районов Республики Бурятия на основе значения индекса аграрно-социального дисбаланса (ИАСД)

Table 2 – Typology of municipal districts of the Republic of Buryatia based on the value of the agrarian-social imbalance index (ASII)

Тип кластера	Диапазон ИАСД	Ключевая характеристика	Примеры муниципальных районов
I. Эффективность без перспектив	ИАСД $> 1,2$	Высокая экономическая эффективность сельского хозяйства при относительно низком качестве жизни и ограниченных альтернативах занятости. Максимальный риск депопуляции.	1. Мухоршибирский 2. Бичурский 3. Кижингинский 4. Джидинский 5. Хоринский 6. Еравнинский
II. Сбалансированное, но уязвимое развитие	$0,8 \leq \text{ИАСД} \leq 1,2$	Умеренный дисбаланс. Относительное равновесие между аграрной эффективностью и социальными условиями, но устойчивость хрупка и зависит от внешней конъюнктуры и климата.	7. Иволгинский 8. Тарбагатайский 9. Заиграевский 10. Кабанский 11. Селенгинский 12. Тункинский
III. Комфорт без развития	$0,5 \leq \text{ИАСД} < 0,8$	Относительно развитая социальная инфраструктура при низкой эффективности и товарности аграрного сектора. Экономика держится на бюджетной сфере, трансфертах.	13. Прибайкальский 14. Баргузинский 15. Курумканский 16. Баунтовский эвенкийский 17. Окинский 18. Северо-Байкальский 19. Муйский 20. Закаменский 21. Кяхтинский

Расчет составных элементов ИАСД выявил следующие закономерности.

Наибольшие значения коэффициента аграрной трансформации (КАТ) показали районы с высокотоварным животноводством и значительными объемами растениеводства. В первую очередь, это районы I кластера: Мухоршибирский, Бичурский, Кижингинский, Джидинский, Хоринский и Еравнинский. Здесь высокая доля товарной продукции (мясо, молоко, зерно) в сочетании с производительностью труда формирует экономический фундамент агросектора.

Наименьшие значения КАТ зафиксированы в северных и горных районах, вошедших в III кластер: Окинский, Баунтовский эвенкийский, Муйский, Северо-Байкальский. В этих муниципалитетах сельское хозяйство

представлено преимущественно личными подсобными хозяйствами и ориентировано на удовлетворение внутрисемейных потребностей, а не на товарное производство. Суровые природные условия и транспортная изоляция делают развитие товарного АПК экономически нецелесообразным.

Анализ индекса качества жизни и возможностей (ИКЖ) показал иную картину. Наивысшие значения ИКЖ сконцентрированы, прежде всего, в пригородных районах II кластера, обладающих развитой транспортной сетью и близостью к рынкам сбыта и занятости г. Улан-Удэ. К ним относятся Иволгинский, Тарбагатайский, Заиграевский и Кабанский районы. Высокие значения ИКЖ также демонстрируют районы с развитой рекреационной сферой и туристическим потенциалом, такие как Тункинский

(вошедший во II тип) и Прибайкальский (III тип), где качество жизни поддерживается за счет неаграрных секторов экономики, даже при слабости товарного сельского хозяйства.

Низкие значения ИКЖ, предсказуемо, характерны для отдаленных, труднодоступных районов III кластера: Баунтовского, Окинско-го, Муйского, Северо-Байкальского, Курумканского, где недостаточно развиты транспортная и социальная инфраструктуры, а уровень доходов населения существенно ниже среднереспубликанского.

Значения климатического мультипликатора варьировались от 0,7 (для северных и высокогорных районов с экстремальными условиями, таких как Окинский, Баунтовский) до 1,15 (для южных районов с относительно благоприятными условиями – Мухоршибирский, Бичурский, Джидинский). Это позволило скорректировать оценку аграрной эффективности, «повысив» ее для территорий, где высокие результаты достигаются ценой больших усилий и рисков.

Произведение скорректированной аграрной эффективности (КАТ × КМ), отнесенное к индексу качества жизни (ИКЖ), дало итоговое значение ИАСД. В результате все 21 муниципальный район были распределены по трем кластерам.

Районы с наиболее высоким КАТ – Мухоршибирский и Бичурский, Кижингинский, Джидинский – продемонстрировали наибольший дисбаланс (ИАСД > 1,2), сформировав I кластер «Эффективность без перспектив». Это означает, что их экономические успехи в сельском хозяйстве не трансформируются в повышение качества жизни, достаточное для удержания населения. Статистические данные подтверждают этот вывод: за 2019-2023 годы совокупное отрицательное сальдо миграции составило -971 человек в Бичурском районе и -931 человек в Мухоршибирском районе, что является максимальными показателями убыли среди всех сельских территорий республики. Высокая миграционная убыль фиксируется и в других районах этого кластера, что убедительно доказывает: инвестиции в агротехнологии без параллельного развития социальной сферы не только не останавливают депопуляцию, но и могут усугублять ее, повышая требования к качеству жизни у более производительной рабочей силы.

II кластер «Сбалансированное, но уязвимое развитие» ($0,8 \leq \text{ИАСД} \leq 1,2$) представлен районами, где достигнут относительный паритет между аграрной эффективностью и качеством жизни. Это, прежде всего, пригородные Иволгинский, Тарбагатайский, Заиграевский, Кабанский районы, а также Тункинский район, где туристический потенциал компенсирует умеренную аграрную эффективность. Однако устойчивость этого баланса хрупка. В Иволгинском и Тарбагатайском районах она сильно зависит от рынка труда и не подвижности агломерации Улан-Удэ, а в

Тункинском – от турпотока и климатических условий, влияющих на кормовую базу.

III кластер «Комфорт без развития» ($\text{ИАСД} < 0,8$) объединил оставшиеся 9 муниципалитетов: Прибайкальский, Баргузинский, Курумканский, Баунтовский эвенкийский, Окинский, Северо-Байкальский, Муйский, Закаменский и Кяхтинский. Эти территории характеризуются либо относительно развитой (на фоне сельской местности) инфраструктурой при слабом товарном сельском хозяйстве (Прибайкальский), либо крайне низкой аграрной эффективностью в сочетании с неразвитой инфраструктурой (северные районы). Попадание, например, Кяхтинского района в этот кластер объясняется деградацией аграрного сектора в постсоветский период при сохранении определенного инфраструктурного каркаса, доставшегося от статуса приграничного центра. Для всех районов этого типа характерна либо моноспециализация на бюджетной сфере, либо ориентация на традиционные промыслы, либо наличие туристического потенциала, который пока не реализован в полной мере.

Таким образом, индекс ИАСД позволяет не только констатировать факт депопуляции, но и выявлять ее природу: в I кластере отток вызван «выталкиванием» из-за контраста между высокой эффективностью труда и низким качеством среды; в III кластере – «выталкиванием» из-за общего отсутствия экономических перспектив. Это различие критически важно для выработки адресной политики.

Выводы. Ключевым фактором депопуляции сельских территорий является не абсолютный уровень развития агросферы или социальной инфраструктуры, а дисбаланс между ними. Выявлена пространственная неоднородность развития, проблемы сельских территорий Бурятии носят разнородный характер и требуют дифференцированного подхода. Универсальные решения для всех районов неэффективны. Разработанный и апробированный на муниципальных районах Республики Бурятия Индекс аграрно-социального дисбаланса (ИАСД) позволил выделить три четких типа территорий. Индекс ИАСД позволяет не только констатировать существующие проблемы, но и выявлять их природу, определяя, что является основным драйвером неблагополучия: гипертрофированное развитие сельского хозяйства, слабость социальной сферы или системная деградация обоих компонентов.

Районы с наиболее высокими показателями экономической эффективности сельского хозяйства (Мухоршибирский, Бичурский) демонстрируют наибольший дисбаланс ($\text{ИАСД} > 1,2$), что свидетельствует о модели «Эффективность без перспектив». Рост производительности в агросекторе без параллельного улучшения качества жизни и создания альтернативных возможностей для занятости усугубляет миграционный отток.

На основе построенной типологии для каждого кластера муниципальных районов предлагается адресный набор мер государственной и региональной политики.

Для кластера I («Эффективность без перспектив»), приоритетом развития должна стать трансформация экономического успеха сельского хозяйства в социальный капитал. В качестве возможных мер по развитию первого кластера предлагаются следующие меры:

- стимулирование инвестиций в перерабатывающие производства на территории районов для создания новых рабочих мест с высокой добавленной стоимостью вне первичного сельхозпроизводства;
- реализация целевых программ по развитию социальной, инженерной и цифровой инфраструктуры, софинансируемых за счет средств, генерируемых эффективным сельским хозяйством (например, через механизмы государственно-частного партнерства);
- развитие образовательных программ и программ поддержки малого бизнеса в сферах, сопутствующих развитию территории (агротуризм, логистика, ремонт техники).

Для кластера II («Сбалансированное, но уязвимое развитие»), в качестве приоритета развития предлагается повышение устойчивости и диверсификация экономики:

- поддержка кооперации и кластеризации малых форм хозяйствования для повышения их конкурентоспособности;
- развитие несырьевого экспорта и нишевых направлений (органическое сельское хозяйство, производство продукции с географическим указанием);
- инвестиции в адаптацию к климатическим изменениям (внедрение влагосберегающих технологий, страхование урожая).

Для кластера III («Комфорт без развития»), предлагается создание неаграрных точек экономического роста:

- активное развитие туристического кластера, поддержка малого и среднего предпринимательства в сфере услуг;
- создание условий для развития удаленной занятости (цифровая инфраструктура, коворкинги);
- реализация программ переобучения и повышения квалификации кадров для работы в новых секторах экономики.

Литература

- 1.Скоморощенко А. А., Першукевич И. П. Экономическая оценка человеческого потенциала сельских территорий муниципального образования // Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2023. № 105. С. 40-48. doi: 10.21515/1999-1703-105-40-48.
- 2.Lewis W. A. Economic Development with Unlimited Supplies of Labour [Электронный ресурс] // The Manchester School. 1954. Vol. 22, № 2. P. 139-191. doi: 10.1111/j.1467-9957.1954.tb00021.x
- 3.Todaro, M. P. A Model for Labor Migration and Urban Unemployment in Less Developed Countries // The American Economic Review. 1969. Vol. 59. No. 1. P. 138-148. URL: Downloads: (external link) [http://links.jstor.org/sici?sici=0002-8282%281969%...O%3B2-M&origin=repec_full_text\(application/pdf\)](http://links.jstor.org/sici?sici=0002-8282%281969%...O%3B2-M&origin=repec_full_text(application/pdf)) Access to full text is restricted to JSTOR subscribers. See <http://www.jstor.org> for details. (accessed: 01.11.2025).
- 4.Решетникова Н. В., Бочарова Е. В. Комплексный анализ взаимосвязи экономических и социокультурных аспектов фермерства // Международный сельскохозяйственный журнал. 2025. № 3(405). С. 340-344. doi: 10.55186/25876740_2025_68_3_340.
- 5.Migration and agricultural development in the Santchou Landscape of Cameroon / T. H. Ngong, B. Ja. Yenlajai, S. J. P. Tume [et al.] // Discover Sustainability. 2025. Vol. 6, No. 1. P. 165. doi: 10.1007/s43621-025-00976-6.
- 6.Устойчивое развитие сельских территорий в системе территориального планирования и пространственного развития / М. А. Смирнова, О. В. Гвоздева, И. В. Чуксин, А. О. Ганичева // Международный сельскохозяйственный журнал. 2021. № 5(383). С. 9-12. doi: 10.24412/2587-6740-2021-5-9-12.
- 7.Семенов В. А., Семенов А. В. Моделирование влияния факторов на численность сельского населения // Экономика сельского хозяйства России. 2025. № 12. С. 119-123. doi: 10.32651/2512-119.
- 8.Miroshnichenko I. V., Samarkina I. V., Tereshina M. V. The Leadership in the Institutional System of Rural Development Policy: The Results of the Empirical Study in Krasnodar Region // RUDN Journal of Political Science. 2023. Vol. 25, No. 3. P. 677-698. doi: 10.22363/2313-1438-2023-25-3-677-698.
- 9.Кучковская Н. В. Институты социального развития сельских территорий // Вопросы российского и международного права. 2022. Т. 12. № 4В. С. 414-420.
- 10.Калафатов Э. А. Понятие «сельские территории» в аспекте стратегии устойчивого развития // Научный вестник: финансы, банки, инвестиции. 2022. № 2(59). С. 183-193.
- 11.Фонотов А. Г., Бергаль О. Е. Территориальные кластеры в системе пространственного развития: зарубежный опыт // Пространственная экономика. 2020. Т. 16. № 4. С. 113-135. doi: 10.14530/se.2020.4.113-135.
- 12.Загазежева О. З., Бжихатлов К. Ч. Разработка модели взаимодействия в социо-эколого-экономической системе сельских территорий в условиях внедрения новых технологий // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2022. № 6(110). С. 194-202. doi:10.35330/1991-6639-2022-6-110-194-202.
- 13.Сергиенко О. В. Социо-эколого-экономические аспекты устойчивого безопасного развития сельского хозяйства // Финансовая экономика. 2021. № 10. С. 193-199.
- 14.Семенов А. В., Фигурек А. Определение конкурентных преимуществ сельских территорий ЕС // Экономика сельского хозяйства России. 2026. № 1. С. 144-149. doi: 10.32651/261-144.
- 15.Вертакова Ю. В., Логинов И. С. Региональная сбалансированность как фактор обеспечения экономической безопасности // Теория и практика сервиса: экономика, социальная сфера, технологии. 2024. № 2 (60). С. 5-9.

References

1. Skomoroshchenko AA, Pershukovich IP. [Economic assessment of the human potential of rural territories of a municipality]. Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2023; 105. 40-48 p. doi: 10.21515/1999-1703-105-40-48.

2. Lewis WA. Economic development with unlimited supplies of labour. [Internet]. The Manchester School. 1954; Vol.22. No.2. 139-191 p. doi: 10.1111/j.1467-9957.1954.tb00021.x
3. Todaro MP. A model for labor migration and urban unemployment in less developed countries. [Internet]. The American Economic Review. 1969; Vol.59. No.1. 138-148 p. [cited 2025, November 1]. Available from: [http://links.jstor.org/sici?sici=0002-8282%281969%...O%3B2-M&origin=repec_full_text \(application/pdf\)](http://links.jstor.org/sici?sici=0002-8282%281969%...O%3B2-M&origin=repec_full_text%28application%2Fpdf%29) Access to full text is restricted to JSTOR subscribers. See <http://www.jstor.org> for details.
4. Reshetnikova NV, Bocharova EV. [Comprehensive analysis of relationship between economic and social-cultural aspects of farming]. *Mezhdunarodnyy selskokhozyaystvennyy zhurnal*. 2025; 3(405). 340-344 p. doi: 10.55186/25876740_2025_68_3_340.
5. Ngong TH, Yenlajai BJa, Tume SJP. Migration and agricultural development in the Santchou Landscape of Cameroon. *Discover Sustainability*. 2025; Vol.6. No.1. 165 p. doi: 10.1007/s43621-025-00976-6.
6. Smirnova MA, Gvozdeva OV, Chuksin IV, Ganicheva AO. [Sustainable development of rural areas in the system of territorial planning and spatial development]. *Mezhdunarodnyy selskokhozyaystvennyy zhurnal*. 2021; 5(383). 9-12 p. doi: 10.24412/2587-6740-2021-5-9-12.
7. Semenov VA, Semenov AV. [Modeling the impact of factors on the size of rural population]. *Ekonomika selskogo khozyaystva Rossii*. 2025; 12. 119-123 p. doi: 10.32651/2512-119.
8. Miroshnichenko IV, Samarkina IV, Tereshina MV. The leadership in the institutional system of rural development policy: the results of the empirical study in Krasnodar region. *RUDN Journal of Political Science*. 2023; Vol.25. No.3. 677-698 p. doi: 10.22363/2313-1438-2023-25-3-677-698.
9. Kuchkovskaya NV. [Institutions for social development of rural territories]. *Voprosy rossiyskogo i mezhdunarodnogo prava*. 2022; Vol.12. 4B. 414-420 p.
10. Kalafatov EA. [“Rural areas” concept in the context of sustainable development strategy]. *Nauchnyy vestnik: finansy, banki, investitsii*. 2022; 2(59). 183-193 p.
11. Fonotov AG, Bergal OE. [Territorial clusters in the spatial development system: foreign experience]. *Prostranstvennaya ekonomika*. 2020; Vol.16. 4. 113-135 p. doi: 10.14530/se.2020.4.113-135.
12. Zagazezheva OZ, Bzhikhatlov KCh. [Development of a model of interaction in social-ecological-economic system of rural territories in the context of new technologies introduction]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2022; 6(110). 194-202 p. doi:10.35330/1991-6639-2022-6-110-194-202.
13. Sergienko OV. [Social-ecological-economic aspects of sustainable safe development of agriculture]. *Finansovaya ekonomika*. 2021; 10. 193-199 p.
14. Semenov AV, Figurek A. [Definition of competitive advantages of rural territories of the EU]. *Ekonomika selskogo khozyaystva Rossii*. 2026; 1. 144-149 p. doi: 10.32651/261-144.
15. Vertakova YuV, Loginov IS. [Regional balance as a factor in ensuring economic security]. *Teoriya i praktika servisa: ekonomika, sotsialnaya sfera, tekhnologii*. 2024; 2(60). 5-9 p.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Баженова Валентина Семеновна – доктор экономических наук, профессор, старший научный сотрудник межкафедральной научной лаборатории экономики сельского хозяйства и природопользования Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова (670010, Российская Федерация, г. Улан-Удэ, ул. Пушкина, 8), e-mail: valbazh@mail.ru, ORCID 0009-0005-7267-7875

Малушко Дарима Жамбиевна – аспирант кафедры бухгалтерского учета и аудита Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова (670010, Российская Федерация, г. Улан-Удэ, ул. Пушкина, 8), e-mail: daramg@yandex.ru, ORCID 0009-0009-9241-7703

Полозова Татьяна Владимировна – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры технологии производства, переработки и стандартизации сельскохозяйственной продукции Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова (670010, Российская Федерация, г. Улан-Удэ, ул. Пушкина, 8), e-mail: tatianapolozova@inbox.ru, ORCID 0009-0007-8954-1522

Шобдоева Надежда Валерьевна – кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой экономики и организации АПК Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова (670010, Российская Федерация, г. Улан-Удэ, ул. Пушкина, 8), e-mail: shnv2019@mail.ru, ORCID 0009-0003-0773-5325

Ванчикова Елена Николаевна – доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры менеджмента Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова (670010, Российская Федерация, г. Улан-Удэ, ул. Пушкина, 8), e-mail: evanch@mail.ru, ORCID 0000-0002-6206-0178

Вклад авторов:

В.С. Баженова - научное руководство, обеспечение ресурсами, научное редактирование текста;
Д.Ж. Малушко - концептуализация исследования, разработка методологии, сбор и анализ данных, написание исходного текста, подготовка финальной версии, визуализация данных, интерпретация результатов и формулировка выводов;

Н.В. Шобдоева - сбор данных, обработка и систематизация данных;

Т.В. Полозова - научное редактирование текста;

Е.Н. Ванчикова - сбор данных, обработка и систематизация данных.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 12.11.2025; одобрена после рецензирования 17.03.2026; принята к публикации 01.04.2026.

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

Authors:

Bazhenova Valentina Semenovna – Doctor of Economics, Professor, senior researcher of Interdepartmental Scientific Laboratory of Agricultural Economics and Nature Management Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov (8 Pushkina Street, Ulan-Ude, 670010, Russian Federation), e-mail: valbazh@mail.ru, ORCID 0009-0005-7267-7875

Malushko Darima Zhambiyevna – post-graduate student of Accounting and Auditing Department Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov (8 Pushkina Street, Ulan-Ude, 670010, Russian Federation), e-mail: daramg@yandex.ru, ORCID 0009-0009-9241-7703

Polozova Tatyana Vladimirovna – Ph.D. of Economic Sciences, Associate Professor of Department of Technology of Production, Processing, and Standardization of Agricultural Products Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov (8 Pushkina Street, Ulan-Ude, 670010, Russian Federation), e-mail: tatianapolozova@inbox.ru, ORCID 0009-0007-8954-1522

Shobdoeva Nadezhda Valerevna – Ph.D. of Economic Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Economics and Organization of the Agro-Industrial Complex Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov (8 Pushkina Street, Ulan-Ude, 670010, Russian Federation), e-mail: shnv2019@mail.ru, ORCID 0009-0003-0773-5325

Vanchikova Elena Nikolaevna – Doctor of Economics, Professor of Management Department Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov (8 Pushkina Street, Ulan-Ude, 670010, Russian Federation), e-mail: evanch@mail.ru, ORCID 0000-0002-6206-0178

Contribution of the authors:

V.S. Bazhenova – Supervision, Resources, Writing – review & editing;

D.Zh. Malushko – Conceptualization, Methodology, Investigation, Writing – original draft, Writing – review & editing, Visualization, Validation;

N.V. Shobdoeva – Investigation, Data curation;

T.V. Polozova – Writing – review & editing;

E.N. Vanchikova – Investigation, Data curation.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.
Submitted 12.11.2025; revised 17.03.2026; accepted 01.04.2026.



**УПРАВЛЕНИЕ ЗАТРАТАМИ НА ПРОИЗВОДСТВО В АГРАРНЫХ
ФОРМИРОВАНИЯХ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВЫХ ПЛАТФОРМ**

© 2026 Говдя В. В. ✉, Дегальцева Ж. В.

*Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина
(г. Краснодар, Российская Федерация)
✉ govdy_v_v@inbox.ru*

Реферат. Управление затратами на производство в аграрных формированиях на основе цифровых платформ представляет собой комплекс мероприятий, направленных на повышение эффективности агробизнеса посредством анализа больших объемов данных, полученных с помощью современных технологий сбора и обработки информации. Современное сельское хозяйство сталкивается с множеством проблем, среди которых снижение урожайности, высокая себестоимость продукции и неэффективное использование ресурсов. Авторы предложили новую классификацию статей расходов, адаптированную под особенности агропредприятий, включающую детальные показатели этапов технологической цепочки в растениеводстве и животноводстве. Информация формируется исключительно цифровыми методами и специальными программами, такими как российская система «Галактика ERP». Использование цифровых платформ позволяет решать эти проблемы путем оптимизации производственных процессов, сокращения издержек и повышения конкурентоспособности сельскохозяйственных предприятий. Исследование основывается на анализе данных, собранных с помощью датчиков, спутниковых снимков, беспилотников и автоматизированных систем управления производством. Ключевые направления включают: автоматизацию учета материальных ресурсов; мониторинг состояния посевов и животных; прогнозирование потребностей в удобрениях и средствах защиты растений; оптимизацию логистических операций; цифровые технологии позволяют сократить затраты на топливо, электроэнергию, трудовые ресурсы и минимизировать риски потерь урожая. Применение цифровых платформ способствует значительному снижению издержек производства, повышению качества сельскохозяйственной продукции и увеличению прибыли аграрных формирований. Исследование подтверждает эффективность внедрения цифровых решений в сельском хозяйстве и подчеркивает необходимость дальнейшего развития соответствующих технологий. Таким образом, управление затратами на производстве становится важным инструментом устойчивого развития сельского хозяйства, способствующим решению глобальных продовольственных проблем и обеспечению экологической устойчивости.

Ключевые слова: аграрные формирования, управление затратами, цифровая платформа, эффективность.

Для цитирования: Говдя В.В., Дегальцева Ж.В. Управление затратами на производство в аграрных формированиях на основе цифровых платформ // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 128-136. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-128-136

**PRODUCTION COST MANAGEMENT IN AGRICULTURAL ENTERPRISES BASED ON
DIGITAL PLATFORMS**

© 2026 Govdya V. V. ✉, Degaltseva Zh. V.

*Kuban State Agrarian University named after I.T.Trubilin
(Krasnodar, Russian Federation)
✉ govdy_v_v@inbox.ru*

Abstract. Production cost management in agricultural enterprises based on digital platforms is a set of measures aimed at improving agribusiness efficiency through the analysis of large volumes of data obtained using modern information collection and processing technologies. Modern agriculture faces numerous challenges, including declining yields, high production costs and inefficient use of resources. The authors propose a new classification of cost items adapted to the specific needs of agricultural enterprises, including detailed indicators of the stages of the process chain in crop and livestock production. This information is generated exclusively by digital methods and specialized programs, such as the Russian "Galaktika ERP" system. Use of digital platforms allows us to address these challenges by optimizing production processes, reducing costs and increasing the competitiveness of agricultural enterprises. The study is based on the analysis of data collected using sensors, satellite imagery, drones and automated production management systems. Key areas include: automated material resource accounting; monitoring crop and livestock conditions; forecasting fertilizer and plant protection product requirements; and optimization of logistics operations. Digital technologies reduce fuel, electricity and labor costs and minimize the risk of crop losses. The use of digital platforms contributes to a significant reduction in

production costs, improved quality of agricultural products and increased profits for agricultural enterprises. The study confirms the effectiveness of implementing digital solutions in agriculture and emphasizes the need for further development of relevant technologies. Thus, cost management in production is becoming an important tool for sustainable agricultural development, contributing to solving global food problems and ensuring environmental sustainability.

Key words: agricultural enterprises, cost management, digital platform, efficiency.

For citation: Govdya VV, Degaltseva ZhV. [Production cost management in agricultural enterprises based on digital platforms]. Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2026; Vol. 21. 1(81). 128-136 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-128-136

Введение. Аграрное формирование – это хозяйствующий субъект, аккумулирующий материальные, трудовые, финансовые и информационные ресурсы, где ключевым фактором эффективности деятельности выступает оптимизация управления затратами. Управление затратами является одной из ключевых функций эффективного ведения сельского хозяйства. Оно охватывает процесс планирования и бюджетирования, учета, анализа и контроля расходов, связанных с производством сельскохозяйственной продукции. Основные цели управления затратами заключаются в обеспечении рационального расходования ресурсов, повышении эффективности производства и максимизации прибыли.

Интеграция аналитических инструментов и методов прогнозирования на цифровых платформах помогает управленческому персоналу с достаточно малым временным фракталом повысить точность оценки рисков и возможностей, связанных с принятием стратегических решений [1, 2, 3]. Кроме того, роль управления затратами заключается в оптимизации производственных процессов, авторами рассмотрена классификация затрат, которая позволяет выявить наиболее эффективные способы организации производственного процесса, сократить издержки и повысить производительность труда, внедрить учет затрат по отклонениям. Анализ затрат дает руководству необходимую информацию для принятия обоснованных решений относительно расширения производства, внедрения новых технологий и инвестиций. Контроль над затратами помогает снизить себестоимость продукции, что делает продукцию более конкурентоспособной на рынке, а также позволяет своевременно выявлять отклонения и предпринимать меры по исправлению ситуации.

Для решения поставленной задачи по выявлению влияния поведения затрат на эффективность предпринимательской деятельности необходимо определить значение затрат в улучшении качества готовой продукции, повышении прибыльности каждого произведенного продукта, обеспечении стабильности и росте доходов аграрного сектора экономики страны. Цель работы состоит в научном обосновании и эмпирической верификации методики управления затратами на производство в аграрных формированиях, базирующейся на использовании инструментария цифровых платформ (в частности, «Галактика ERP») для детализации статей расходов и оперативного контроля издержек.

Условия, материалы и методы. Теоретико-методологической основой исследования является:

- обзор существующих научных исследований и теоретических концепций управления поведением затрат;
- использование методов калькулирования издержек производства продукции (стандарт-костинг, директ-костинг);
- анализ факторов, влияющих на уровень затрат (ценовые колебания сырья, энергоносителей, погодные условия, рыночные риски);
- применение инструментов стратегического менеджмента и контроллинга в управлении ресурсами агропредприятий.

Объектом исследования выступают сельскохозяйственные организации и предприятия различных форм собственности. Основное исследование проведено по 78 аграрным формированиям центральной природно-экономической зоны Краснодарского края. Предметом исследования определены механизмы управления затратами и повышения экономической эффективности производства сельскохозяйственной продукции.

При написании статьи применялись методы эмпирического исследования:

- анкетирование руководителей сельскохозяйственных предприятий;
- интервью с экспертами аграрного сектора;
- сбор и обработка статистической отчетности по производству и финансированию сельскохозяйственных предприятий;
- моделирование сценариев оптимизации производственных процессов и сокращения расходов.

При проведении исследования учитывались объективные ограничения:

- уровень технической оснащенности некоторых сельскохозяйственных организаций;
- необходимость адаптации цифровых решений к специфическим условиям сельскохозяйственного производства региона;
- ограниченность финансирования ряда проектов цифровизации.

Таким образом, данное исследование позволяет выявить ключевые факторы успешного внедрения цифровых платформ в управление затратами аграрных формирований, а также определить основные направления повышения экономической эффективности сельских производителей.

Результаты и обсуждение. Затраты представляют собой расходы хозяйствующего субъекта, выраженные в денежной форме, понесенные для производства продукции,

выполнения работ или оказания услуг [4, 5, 6]. В традиционной учетно-контрольной системе аграрных формирований затраты классифицируются следующим образом:

- 1) по экономическим элементам:
 - материальные затраты (семена, удобрения, корма, топливо и т. п.);
 - амортизация основных и нематериальных активов;
 - оплата труда персонала хозяйства;
 - отчисления на социальные нужды;
 - прочие затраты (например, налоги, страховые платежи).
- 2) по способу включения в себестоимость:
 - прямые затраты (непосредственно связаны с производством конкретного вида готовой продукции);
 - косвенные затраты (не могут быть прямо отнесены на конкретные объекты учета).
- 3) по отношению к объему производства:
 - постоянные затраты (независимы от объема производства готовой продукции);
 - переменные затраты (меняются с изменением объемов производства готовой продукции).
- 4) по целевому назначению:
 - производственные затраты (связаны непосредственно с производственным процессом);
 - коммерческие затраты (затраты на реализацию продукции);
 - управленческие затраты (расходы на управление хозяйствующим субъектом) [7, 8].

В целях рационального управления затратами необходимо каждую калькуляционную статью увязать с технологическими картами производства готовой продукции растениеводства и животноводства. Это выполняется в модульном блоке системы «Галактика-ERP» – наборе взаимосвязанных, но относительно независимых компонентов, которые позволяют пользователям оценить исполнение бюджета расходов. Такая классификация позволяет научно разрабатывать нормы и нормативы расхода ресурсов, формировать бюджеты расходов, анализировать структуру себестоимости, выявлять резервы снижения издержек и повышать эффективность предпринимательской деятельности.

Для эффективного управления затратами важно правильно организовать процесс их анализа и планирования. Основными методами являются:

а) нормативный метод. Метод предполагает установление норм расхода материалов, топлива, электроэнергии и других ресурсов на единицу продукции. Отклонение фактических показателей от нормативных позволяет выявлять причины неэффективности и разрабатывать мероприятия по снижению издержек. В учетно-контрольной системе аграрных формирований для установления рационального использования затрат по калькуляционным статьям применяют способ их учета по отклонениям;

б) метод директ-костинга. Данный метод основан на разделении всех затрат на постоянные и переменные. Это помогает точнее определять маржинальную прибыль каждого вида готовой продукции и принимать обоснованные решения относительно ассортимента выпускаемой продукции [9, 10, 11];

в) бюджетирование. Процесс составления бюджетов включает разработку планов доходов и расходов на определенный период. Важно предусмотреть резервы на случай непредвиденных обстоятельств, что позволит минимизировать риски возникновения дефицита денежных средств.

Эффективное управление поведением затрат требует глубокого понимания факторов, определяющих их величину. К таким факторам относятся:

- цены на сырье и материалы;
- уровень инфляции;
- налоговая политика государства;
- конъюнктура рынка аграрной продукции;
- техническое оснащение хозяйствующих субъектов;
- организация труда и системы управления;
- качество используемого сырья и материалов;
- уровни квалификации и компетентности персонала [12, 13].

Оптимизация затрат подразумевает выявление резервов снижения издержек без ущерба качеству продукции и рентабельности предпринимательской деятельности. Исследованием установлено, что в аграрных формированиях производственный процесс осуществляется на интенсивной основе (табл. 1). Это подтверждается перманентным ростом затрат на производство готовой продукции как в целом, так и в расчете на единицу земельной площади и голову скота.

Таблица 1 – Динамика производственных затрат в аграрных формированиях Краснодарского края

Table 1 – Dynamics of production costs in agricultural formations of the Krasnodar Kray

Показатель	Годы					2024 г. в % к	
	2020	2021	2022	2023	2024	2020 г.	2023 г.
Материальные затраты	124599	148187	177049	175764	200431	160,9	114,0
Амортизация	18812	19842	25535	28114	29968	158,3	106,6
Оплата труда персонала	30649	31999	35446	35296	39048	127,4	110,6
Отчисления на социальные нужды	8592	9372	9293	9395	10572	123,0	112,5
Прочие	15545	16214	18830	19989	24364	156,7	122,9
Итого	198197	225614	266153	268558	304383	153,6	113,3

Разработано авторами
Developed by the authors

При этом отметим, что более высокими темпами за исследуемый временной фрактал росли расходы хозяйствующих субъектов на сырье, материалы, семена, корма, средства защиты растений и животных от вредителей и болезней, топливо и т.п.

Данный рост материальных затрат происходит не только за счет роста стоимости этих ресурсов, но и за счет выполнения установленных технологией норм и нормативов. В 2024 году по сравнению с 2020 годом общая сумма затрат аграрных формирований увеличилась на 106,1 трлн. руб., или на 53,6%. При этом материальные затраты росли еще более высокими темпами (+60,9%).

За анализируемый период в исследуемых хозяйствующих субъектах зафиксирован устойчивый рост расходов на оплату труда персонала. В 2024 году объем соответствующих затрат увеличился по сравнению с 2020 годом на 8399 млрд руб., что в относительном выражении составило 27,4%. Отмечается, что увеличение данных расходов оказывает положительное влияние на производительность труда, социальный климат в трудовых коллективах и качество жизни сельского населения.

За период 2020-2024 годы в аграрных формированиях прослеживается тенденция

укрепления материально-технической базы. Об этом свидетельствуют показатели динамики амортизационных отчислений в структуре затрат на производство совместно с коэффициентами поступления и ликвидации основных средств, отражающие процесс активного обновления материально-технической базы. Принципиальной особенностью последних лет является не просто единичная замена устаревшей техники, а восстановление целостной системы машин, обеспечивающей комплексное выполнение всех технологических операций в растениеводстве и животноводстве.

Данный процесс сопровождается характерным для интенсификации производства изменением структуры затрат: доля прошлого (овеществленного) труда в виде амортизации современного оборудования возрастает, тогда как удельные затраты живого труда на единицу готовой продукции снижаются, что свидетельствует о повышении общего уровня производительности и технологической эффективности производства.

На рис. 1 визуальное можно отметить, что самую существенную долю занимают материальные затраты, как в 2020 году, так и в 2024 году.

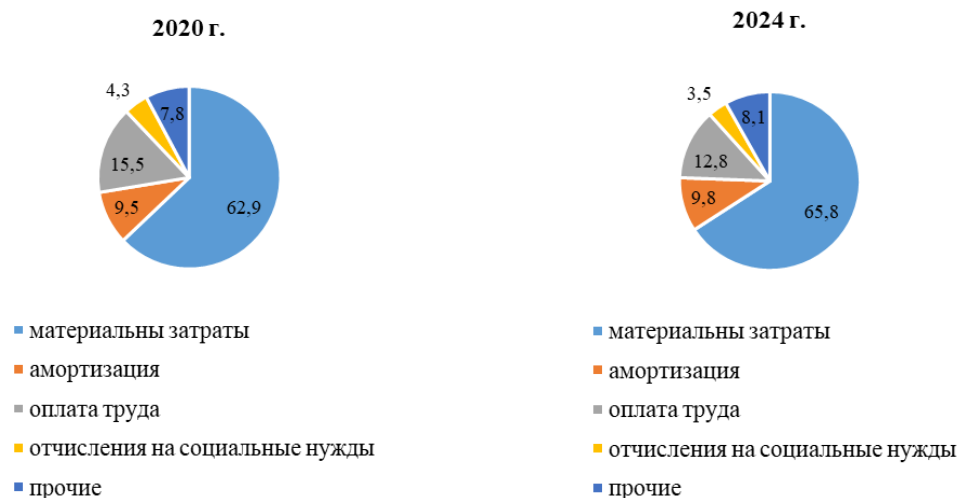


Рис. 1 – Структура затрат по элементам в аграрных формированиях Краснодарского края (разработано авторами)

Fig. 1 – Cost structure by elements in agricultural formations of the Krasnodar Kray (developed by the authors)

Детальный анализ структуры затрат на производство готовой продукции в аграрных формированиях за последние десять лет не выявил существенных отклонений, которые могли бы однозначно свидетельствовать о системных нарушениях технологических регламентов. Однако для формулирования обоснованных выводов о степени соблюдения технологий производства необходимо учитывать, что агрегированные данные по совокупности хозяйств региона нивелируют отраслевую специфику. В различных предприятиях применяются неодинаковые технологии возделывания культур и

содержания животных, закрепленные в технологических картах. Возможные отступления от регламентов, как правило, обусловлены форс-мажорными погодными условиями, либо незначительными организационно-экономическими факторами и не носят системного характера.

Вместе с тем, учитывая динамичность научно-технического прогресса, актуализируется задача поиска и внедрения практических мер по оптимизации расходов. В связи с этим представляется целесообразным выделить следующие основные направления соответствующих мероприятий:

1. Рациональная организация производственного процесса. Повышение производительности труда путем внедрения новых технологий обработки почвы, посевов семян и внесения удобрений, уборки урожая. Использование современных сортов семян и высокоэффективных удобрений способствует увеличению урожайности и снижает потребность в ресурсах. Выращивание высокопродуктивных животных с применением высокобелковых соединений в кормах животных приводят к росту производства конечного продукта, повышению качества и снижению себестоимости. Здесь отметим, что роль корпоративного контроля за соблюдением технологии производства и рационального использования ресурсов осуществляется с применением учета расходов по отклонениям, научно-обоснованного бюджетирования расхода ресурсов. В аграрных формированиях Краснодарского края в управленческом учете стали широко применять такие инновационные системы учета затрат как директ-костинг, стандарт-костинг и др. Эти системы учета существенно усиливают контроль за процессом расхода ресурсов.

2. Совершенствование системы материально-технического обеспечения. Заключение долгосрочных контрактов с поставщиками сырья и материалов обеспечивает стабильность цен и качество поставляемых

ресурсов. Формирование запасов необходимых сырья и материалов в рациональных объемах позволяет избежать перебоев в производстве и связанных с ними потерь. Например, управление запасами «точно в срок» (Just-in-Time, JIT) – это стратегия, направленная на минимизацию запасов и снижение затрат путем получения ресурсов, точно в тот момент, когда они необходимы в производственном процессе. Система «JIT» предполагает синхронизацию поставок с производством и минимизацию времени между доставкой ресурсов и их использованием [14, 15, 16].

3. Улучшение организации и стимулирования труда. Применение прогрессивных форм оплаты труда мотивирует заинтересованность персонала в повышении результатов своей деятельности. Обучение сотрудников новым технологиям повышает их квалификацию и компетентность, положительно сказывается на общих результатах предпринимательской деятельности.

4. Автоматизация управленческих процессов. Использование информационных технологий облегчает сбор и обработку информации о затратах, улучшает контроль над финансовыми потоками, ускоряет принятие решений руководством хозяйствующего субъекта [17, 18, 19]. Исследованием установлено, что в структуре расходов хозяйствующих субъектов доля управленческих расходов возрастает (табл. 2).

Таблица 2 – Динамика прямых, коммерческих и управленческих расходов в аграрных формированиях Краснодарского края

Table 2 – Dynamics of direct, commercial, and administrative expenses in agricultural formations of the Krasnodar Kray

Вид расходов	Годы					2024 г. в % к	
	2020	2021	2022	2023	2024	2020 г.	2023 г.
Прямые	189620	208975	226150	256583	297666	157,0	116,0
то же в % к итогу	91,4	88,9	87,9	88,1	85,8	х	х
Коммерческие	11732	14115	16369	18733	20030	170,7	106,9
то же в % к итогу	5,7	6,0	6,4	6,4	5,8	х	х
Управленческие	6081	11909	14773	16087	19434	319,6	120,8
то же в % к итогу	2,9	5,1	5,7	5,5	8,4	х	х
Итого	207433	234999	257292	291403	347130	167,3	119,1

Разработано авторами
Developed by the authors

Анализ динамики управленческих расходов в аграрных формированиях Краснодарского края выявил существенное изменение их доли в структуре совокупных затрат. В 2021 году наблюдался кратный рост данного показателя – с 2,9% до 5,1%. Подобная динамика обусловлена активизацией процессов цифровизации управленческих процессов в хозяйствующих субъектах региона. Увеличение расходов на внедрение ИТ-технологий и специализированного программного обеспечения, являясь ключевым фактором роста управленческих затрат, одновременно создает предпосылки для повышения оперативности и качества принимаемых решений, что в перспективе

обеспечивает оптимизацию производственных издержек. Примечательно то, что в структуре управленческих расходов в целях повышения эффективности обеспечения управленческого персонала толерантной, достоверной и качественной информацией существенно выросли расходы на использование искусственного интеллекта, цифровых способов и инструментов формирования рациональной базы дескрипторов – натуральных и стоимостных показателей, отражающих состояние и развитие предпринимательской деятельности [20, 21].

Информационной базой для исследований послужили данные бухгалтерского учета и отчетности 78 хозяйствующих субъектов

аграрных формирований центральной при-родно-экономической зоны Краснодарского края. Совокупность этих субъектов была

разделена на три группы по доле затрат в управленческих расходах на IT-технологии (табл. 3).

Таблица 3 – Группировка аграрных формирований центральной зоны Краснодарского края по доле затрат на IT-технологии в управленческих расходах, 2024 год

Table 3 – Grouping of agricultural formations in the central zone of the Krasnodar Kray by the share of IT-technology costs in administrative expenses, 2024

Группы хозяйств по доле затрат на IT-технологии, %	Количество хозяйств в группе, ед.	Доля затрат на IT-технологии в среднем по группе, %	Произведено валовой продукции в действующих ценах в расчете на:			Рентабельность производства, %
			1 руб. среднегодовой стоимости основных средств, руб.	на одного среднегодового работника, тыс. руб.	1 руб. среднегодовой стоимости оборотных средств, руб.	
до 9,0	35	7,2	0,88	4324	0,77	24,9
9,1-14,0	25	12,4	1,12	6217	0,98	33,4
свыше 14,1	18	16,9	1,36	7128	1,21	39,1
Итого и в среднем	78	10,9	1,21	5578	0,95	30,9

Разработано авторами
Developed by the authors

В 2024 году затраты на искусственный интеллект и цифровые технологии составили в среднем 10,9% общих управленческих расходов сельскохозяйственных организаций. У наиболее успешных хозяйств этот показатель достигал 16,9%, охватывая 18 хозяйств (23,1%). Такие хозяйства демонстрируют наивысшие показатели эффективности:

- фондоотдача – 1,36 руб.;
- материалоотдача – 1,21 руб.;
- производительность труда – один работник производил продукцию в действующих ценах на сумму 7,1 млн. рублей, что превышает средний уровень первой группы хозяйств на 2,8 млн. руб. (или на 64,8%).

Средняя рентабельность сельскохозяйственного производства в передовых хозяйствах составила 39,1%. Это позволяет финансировать предпринимательство на условиях роста и расширения бизнеса. К числу лидеров отрасли относятся такие аграрные формирования Краснодарского края, как: АО фирма «Агрокомплекс» имени Н.И. Ткачева (Выселковский район), АО «Рассвет» (Усть-Лабинский район), ООО Агрохолдинг «Каневской» концерн «Покровский», ГАП «Ресурс».

В результате специального мониторинга управленческого процесса на основе информационного поля учетной триады доказано, что инновационные технологические достижения играют ключевую роль в повышении эффективности и надежности ведения учета в сельском хозяйстве.

Основные направления цифровизации включают:

- автоматизацию документооборота с использованием электронных подписей и облачных сервисов;
- расширение возможностей аналитики путем внедрения инструментов Big Data и искусственного интеллекта;

- повышение точности расчетов благодаря использованию автоматизированных алгоритмов и специализированных приложений;
- оптимизацию бизнес-процессов посредством внедрения ERP-систем и CRM-решений [22, 23].

Среди наиболее перспективных технологических решений выделяются:

Система электронного документооборота (ЭДО) – электронная передача документов и обмена данными между организациями снижает бумажную нагрузку и ускоряет прохождение платежей и оформления фактов хозяйственной жизни и операций.

Автоматизированные программные комплексы обработки данных учета такие как SAP Business One, 1C и аналоги – помогают организовать единый информационный центр для всех видов учета, обеспечивая удобство сбора, обработки и анализа информации.

Использование геоинформационных систем (ГИС) – позволяет эффективно управлять земельными ресурсами, контролировать состояние полей и вести точный учет урожайности агрокультур и продуктивности животных.

Роботизация и автоматизация технологических операций, применяемые для быстрого заполнения типовых форм отчетности и снижения количества ошибок при вводе данных [24].

Полученные результаты предпринимательской деятельности аграрных формирований Краснодарского края были бы не возможны без государственной поддержки. Государство оказывает значительное влияние на экономику сельского хозяйства посредством различных мер поддержки. Например, субсидии позволяют компенсировать часть затрат производителей на приобретение техники, удобрений, горючего, запасных частей. Регулирование цен на продукцию также играет

важную роль в поддержании доходности сельскохозяйственных организаций.

Однако государственная поддержка должна быть направлена не только на покрытие текущих убытков хозяйств, но и стимулировать развитие инновационных методов ведения сельскохозяйственного производства, внедрение передовых технологий и повышение конкурентоспособности отечественных сельхозпроизводителей на внутреннем и внешнем рынках.

Выводы. Управление затратами является ключевым элементом успешной стратегии развития любого аграрного формирования. Грамотное применение аналитических

инструментов, выбор рациональной структуры производства, использование достижений науки и техники, совершенствование организационных структур способствуют значительному улучшению финансового состояния хозяйствующих субъектов отрасли. Для достижения устойчивого роста необходимы комплексные меры по управлению всеми видами ресурсов, включая человеческие, материально-технические и финансовые ресурсы.

Таким образом, эффективное управление затратами в аграрных формированиях становится залогом повышения их конкурентоспособности, устойчивости и перспектив дальнейшего успешного развития.

Литература

1. Хусейнова А.А., Юсуф А.А., Чайковский Д. Управление данными и аналитикой на агропромышленном предприятии как драйвер модернизации отраслевых кластеров и структурной перестройки региональной экономики // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2026. № 1. С. 106-113. doi: 10.31442/0235-2494-2026-0-1-106-113.
2. Чурсин А.А., Кокуйцева Т.В. Развитие методов оценки цифровой зрелости организации с учетом регионального аспекта // Экономика региона. 2022. Т. 18. № 2. С. 450-463. doi: 10.17059/ekon.reg.2022-2-11.
3. Torok L. Industry 4.0 from a Few Aspects, in Particular in Respect of the Decision Making of the Management. Will the New Industrial Revolution Change the Traditional Management Functions? // International Review of Applied Sciences and Engineering. 2020. Vol. 11, issue 2. pp. 140-146. doi: 10.1556/1848.2020.20020.
4. Добровлянин В.Д., Антиескул Е.А. Цифровизация сельского хозяйства: текущий уровень цифровизации в Российской Федерации и перспективы дальнейшего развития // Цифровые модели и решения. 2022. Т. 1. № 2. С. 5. doi: 10.29141/2782-4934-2022-1-2-5.
5. Amaral A., Pups P. SMEs and Industry 4.0: Two Case Studies of Digitalization for a Smoother Integration // Computers in Industry. 2021. Vol. 125. doi: 10.1016/j.compind.2020.103333.
6. Value Creation and Value Capture Alignment in Business Model Innovation: A Process View on Outcome-Based Business Models / D. Sjödin [et al.] // Journal of Product Innovation Management. 2020. Vol. 37, issue 2. pp. 158-183. doi: 10.1111/jpim.12516.
7. Александрова Н.Р., Субаева А.К., Чутчева Ю.В. Цифровизация сельского хозяйства: тенденции и перспективы развития // Естественно-гуманитарные исследования. 2024. № 2(52). С. 25-30. doi:10.32651/233-76.
8. Швейва Е.И. Трансформация менеджмента в условиях цифровой экономики // Экономика и управление. 2023. 29(5):533-538. doi: 10.35854/1998-1627-2023-5-533-538.
9. Борисов О.И. Цифровые финансовые активы как инструмент развития сельскохозяйственного финансирования и их налоговые риски // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2026. № 1. С. 150-161. doi: 10.31442/0235-2494-2026-0-1-150-161.
10. Sotskova S.I., Kalashnikova I.V. Comprehensive Assessment of Enterprise's Economic Security System in the Digital Economy Conditions // Digital Technologies in the New Socio-Economic Reality. Lecture Notes in Networks and Systems, Samara, 27-29 апреля 2021 года. Samara: Springer Nature, 2022. pp. 513-520. doi: 10.1007/978-3-030-83175-2_64.
11. The Effect of Digitalization on Business Performance: An Applied Study of KIBS /S. Ribeiro-Navarrete [et al.] // Journal of Business Research. 2021. Vol. 126. Pp. 319-326. doi: 10.1016/j.jbusres.2020.12.065.
12. Воронова Е.Ю., Векшина А.А. Совершенствование организации анализа затрат в условиях цифровой среды // Экономика и управление. 2023. 29(2):141-149. doi: 10.35854/1998-1627-2023-2-141-149.
13. Обухов А.А., Обухова Е. А., Щербакова Н. А. Применение технологий искусственного интеллекта в АПК для повышения уровня продовольственного обеспечения // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2025. № 1. С. 54-58. doi: 10.31442/0235-2494-2025-0-1-54-58.
14. Lucchetti R., Sterlacchini A. The Adoption of ICT among SMEs: Evidence from an Italian Survey // Small Business Economics. 2004. Vol. 23. pp. 151-168. doi: 10.1023/B:SBEJ.0000027667.55821.53.
15. Пучкова С.И., Симонова М.Д. Актуальные вопросы организации эффективной системы управления затратами в условиях конкурентной среды // Экономика и управление. 2023. 29(4):443-452. doi: 10.35854/1998-1627-2023-4-443-452.
16. Грешонков А.М. Стратегия модернизации сельского хозяйства в условиях перехода к цифровой экономике // Организатор производства. 2022. Т.30. № 1. С. 113-120. doi: 10.36622/VSTU.2022.90.76.011.
17. Новичков Н., Новичкова А., Долганова О. И. О готовности компаний к цифровой трансформации // Общество и экономика. 2018. Выпуск 8 С. 84-95. doi: 10.31857/S020736760000815-5.
18. Шемякин А.В., Шемякин Б.Г., Шашкова И.Г. Повышение эффективности управления агропромышленным комплексом Рязанской области на основе внедрения цифровых технологий // Фундаментальные исследования. 2021. № 4. С. 116-122. doi: 10.17513/fr.43010.
19. Fatorachian H., Kazemi H. Impact of Industry 4.0 on Supply Chain Performance // Production Planning and Control. 2021. Vol. 32, issue 1. pp. 63-81. doi: 10.1080/09537287.2020.1712487.
20. Мещерякова А.Б. Методы и стратегии адаптации предпринимательских структур в условиях экономического кризиса и цифровой трансформации: анализ тенденций 2010-2022 годов // Экономика и предпринимательство. 2025. № 1(174). С. 1473-1479. doi: 10.34925/EIP.2024.174.1.268.
21. Монахов С.В. Структурные изменения в системе обеспечения технологической независимости АПК России: цифровизация сельского хозяйства // Экономика сельского хозяйства России. 2025. №4.

(цифровизация в АПК). С. 64-69.

22. Влияние управленческого учета на повышение эффективности финансово-хозяйственной деятельности экономических субъектов / Т.М. Рогоуленко, А.В. Бодяко, С.В. Пономарева, М.В. Краюшкина // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. 2025. №1. С. 342-347. doi:10.56584/1560-8816-2025-1-342-347.

23. Газетдинов М.Х. Механизмы влияния социально-экономических факторов сельских территорий на результаты аграрного производства // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022. Т. 17. № 2 (66). С. 119-123. doi: 10.32651/233-76.

24. Зинич А.В. Цифровизация в сельском хозяйстве: проблемы и ожидания молодежи // Экономика труда, 2022. № 12. С. 26-31. doi: 10/18334/et.9.12.116884.

References

1. Khuseynova AA, Yussuf AA, Chaykovskiy D. [Data and analytics management in an agro-industrial enterprise as a driver of industry cluster modernization and structural restructuring of regional economy]. *Ekonomika selskokhozyaystvennykh i pererabatyvayushchikh predpriyatiy*. 2026; 1. 106-113 p. doi: 10.31442/0235-2494-2026-0-1-106-113.

2. Chursin AA, Kokuytseva TV. [Development of methods for assessing the digital maturity of organization, taking into account the regional aspect]. *Ekonomika regiona*. 2022; Vol.18. 2. 450-463 p. doi: 10.17059/ekon.reg.2022-2-11.

3. Torok L. Industry 4.0 from a few aspects, in particular in respect of the decision making of the management. Will the new industrial revolution change the traditional management functions? *International Review of Applied Sciences and Engineering*. 2020; Vol.11. Issue 2. 140-146 p. doi: 10.1556/1848.2020.20020.

4. Dobrovlyanin VD, Antineskul EA. [Digitalization of agriculture: current level of digitalization in the Russian Federation and prospects for further development]. *Tsifrovye modeli i resheniya*. 2022; Vol.1. 2. 5 p. doi: 10.29141/2782-4934-2022-1-2-5.

5. Amaral A, Pups P. SMEs and Industry 4.0: two case studies of digitalization for a smoother integration. *Computers in industry*. 2021; Vol.125. doi: 10.1016/j.compind.2020.103333.

6. Sjodin D. Value creation and value capture alignment in business model innovation: a process view on outcome-based business models. *Journal of Product Innovation Management*. 2020; Vol.37. Issue 2. 158-183 p. doi: 10.1111/jpim.12516.

7. Aleksandrova NR, Subaeva AK, Chutcheva YuV. [Digitalization of agriculture: trends and development prospects]. *Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya*. 2024; 2(52). 25-30 p. doi: 10.32651/233-76.

8. Shveeva EI. [Management transformation in digital economy]. *Ekonomika i upravlenie*. 2023; 29(5). 533-538 p. doi: 10.35854/1998-1627-2023-5-533-538.

9. Borisov OI. [Digital financial assets as a tool for developing agricultural financing and their tax risks]. *Ekonomika selskokhozyaystvennykh i pererabatyvayushchikh predpriyatiy*. 2026; 1. 150-161 p. doi: 10.31442/0235-2494-2026-0-1-150-161.

10. Sotskova SI, Kalashnikova IV. Comprehensive assessment of enterprise's economic security system in the digital economy conditions. Digital technologies in the new socio-economic reality. Lecture notes in networks and systems, Samara, 27-29 aprelya 2021 goda. Samara: Springer nature. 2022; 513-520 p. doi: 10.1007/978-3-030-83175-2_64.

11. Ribeiro-Navarrete S. The effect of digitalization on business performance: an applied study of KIBS. *Journal of Business Research*. 2021; Vol.126. 319-326 p. doi: 10.1016/j.jbusres.2020.12.065.

12. Voronova EYu, Vekshina AA. [Improving the organization of cost analysis in digital environment]. *Ekonomika i upravlenie*. 2023; 29(2). 141-149 p. doi: 10.35854/1998-1627-2023-2-141-149.

13. Obukhov AA, Obukhova EA, Shcherbakova NA. [Application of artificial intelligence technologies in the agro-industrial complex to increase the level of food supply]. *Ekonomika selskokhozyaystvennykh i pererabatyvayushchikh predpriyatiy*. 2025; 1. 54-58 p. doi: 10.31442/0235-2494-2025-0-1-54-58.

14. Lucchetti R, Sterlacchini A. The adoption of ICT among SMEs: evidence from an Italian survey. *Small Business Economics*. 2004; Vol.23. 151-168 p. doi: 10.1023/B:SBEJ.0000027667.55821.53.

15. Puchkova SI, Simonova MD. [Actual issues of organizing an effective cost management system in a competitive environment]. *Ekonomika i upravlenie*. 2023; 29(4). 443-452 p. doi.org/10.35854/1998-1627-2023-4-443-452.

16. Greshonkov AM. [Agriculture modernization strategy in the context of transition to a digital economy]. *Organizator proizvodstva*. 2022; Vol.30. 1. 113-120 p. doi: 10.36622/VSTU.2022.90.76.011.

17. Novichkov N, Novichkova A, Dolganova OI. [Companies' readiness for digital transformation]. *Obshchestvo i ekonomika*. 2018; issue 8 84-95 p. doi: 10.31857/S020736760000815-5.

18. Shemyakin AV, Shemyakin BG, Shashkova IG. [Improving the efficiency of agro-industrial complex management of Ryazan region based on introduction of digital technologies]. *Fundamentalnye issledovaniya*. 2021; 4. 116-122 p. doi: 10.17513/fr.43010.

19. Fatorachian H, Kazemi H. Impact of Industry 4.0 on supply chain performance. *Production planning and control*. 2021; Vol.32. Issue 1. 63-81 p. doi: 10.1080/09537287.2020.1712487.

20. Meshcheryakova AB. [Methods and strategies for adapting business structures in the context of economic crisis and digital transformation: analysis of trends from 2010 to 2022]. *Ekonomika i predprinimatelstvo*. 2025; 1 (174). 1473-1479 p. doi: 10.34925/EIP.2024.174.1.268.

21. Monakhov SV. [Structural changes in the system of ensuring technological independence of Russian agro-industrial complex: digitalization of agriculture]. *Ekonomika selskogo khozyaystva Rossii*. 2025; 4. (tsifrovizatsiya v APK). 64-69 p.

22. Rogulenko TM, Bodyako AV, Ponomareva SV, Krayushkina MV. [Impact of management accounting on improving the efficiency of financial and economic activities of economic entities]. *RISK: Resursy, Informatsiya, Snabzhenie, Konkurentsiya*. 2025; 1. 342-347 p. doi: 10.56584/1560-8816-2025-1-342-347.

23. Gazetdinov MKh. [Mechanisms of influence of social and economic factors in rural areas on agricultural production results]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022; Vol.17. 2 (66). 119-123 p. doi: 10.32651/233-76.

24. Zinich AV. [Digitalization in agriculture: problems and expectations of young people]. *Ekonomika truda*. 2022; 12. 26-31 p. doi: 10/18334/et.9.12.116884.

Конфликт интересов. Авторы заявляют о отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Говдя Виктор Виленович – доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой бухгалтерского учета Кубанского государственного аграрного университета имени И. Т. Трубилина (350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, д.13), e-mail: govdy_v_v@inbox.ru, ORCID 0000-0002-5408-4874
Дегальцева Жанна Владимировна – кандидат экономических наук, профессор кафедры бухгалтерского учета Кубанского государственного аграрного университета имени И. Т. Трубилина (350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, д.13), e-mail: degalceva_1996@inbox.ru, ORCID 0000-0003-2413-4276

Вклад авторов:

В.В. Говдя – изучение, обработка и систематизация публикации по изучаемой проблеме, организация анализа материалов авторских исследований по изучаемой проблеме, итоговые выводы;
 Ж.В. Дегальцева – изучение, обработка и редактирование текста, доработка текста.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 31.07.2025; одобрена после рецензирования 16.03.2026; принята к публикации 01.04.2026.

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

Authors:

Govdya Viktor Vilenovich – Doctor of Economics, Professor, Head of Accounting Department Kuban State Agrarian University named after I.T.Trubilin (13 Kalinina Street, Krasnodar, 350044, Russian Federation), e-mail: govdy_v_v@inbox.ru, ORCID 0000-0002-5408-4874

Degaltseva Zhanna Vladimirovna – Ph.D. of Economic Sciences, Professor of Accounting Department Kuban State Agrarian University named after I.T.Trubilin (13 Kalinina Street, Krasnodar, 350044, Russian Federation), e-mail: degalceva_1996@inbox.ru, ORCID 0000-0003-2413-4276

Contribution of the authors:

V.V. Govdya – Study, processing, and systematization of publications on the research problem, Organization of analysis of materials from authorial studies on the topic, Formulation of final conclusions;
 Zh.V. Degaltseva — Study, processing, and editing of the text, Text revision.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 31.07.2025; revised 16.03.2026; accepted 01.04.2026.



ВЛИЯНИЕ ЭКЗОГЕННЫХ ФАКТОРОВ НА РАЗВИТИЕ АПК БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2026 Китаёв Ю. А.¹✉, Китаёва О. В.¹, Алейник Е. С.²

¹Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
(г. Пушкин, Российская Федерация)

²Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина
(п. Майский, Российская Федерация)

✉ yurgenk@inbox.ru

Реферат. Центральнo-Черноземный регион обеспечивает производство 16,3% продукции сельского хозяйства, располагая всего 6,0% сельскохозяйственных угодий. Только Белгородская область по данным Росстата в 2024 году произвела 10,8% национального объема продукции животноводства. Но в макрорегионе сложилась негативная тенденция замедления агропромышленного производства на фоне роста отрасли в целом по стране, что требует выявления факторов, оказывающих негативное воздействие. Научная новизна исследования состоит в получении новых эмпирических данных о высокой тесноте связи между темпами роста производства продукции сельского хозяйства в исследуемых объектах и ценами производителей, а также выявлении умеренной зависимости от объемов экспорта. Установлено, что при общем росте АПК в Российской Федерации наблюдается негативная тенденция снижения производства в ряде субъектов ЦЧР. Особенность развития ЦЧР обусловлена тем, что ряд входящих в него субъектов являются приграничными. В 2024 году в ЦЧР темп роста производства продукции сельского хозяйства составил 94,9%, в то время как в среднем по стране он оценивался на уровне 106,7%. Выявлено существенное влияние цен производителей сельскохозяйственной продукции на темпы развития отрасли (коэффициент парной корреляции составил: РФ – 0,86; ЦЧР – 0,67; Белгородская область – 0,70). Установлено отсутствие прямой корреляции между инфляционными процессами и темпами роста АПК. Исследование показало, что экспорт сельскохозяйственной продукции демонстрирует устойчивый рост, достигнув 45 млрд долларов в 2024 году. При этом объем импорта и экспорта оказывает на развитие сельского хозяйства опосредованное влияние. Практическая значимость работы состоит в разработке комплекса мер по поддержке АПК, включающего финансово-кредитные механизмы и повышение инвестиционной привлекательности отрасли на приграничных территориях.

Ключевые слова: ЦЧР, Белгородская область, индекс производства, экзогенные факторы, уровень инфляции, ключевая ставка, индекс цен, импорт, экспорт, корреляция.

Для цитирования: Китаёв Ю.А., Китаёва О.В., Алейник Е.С. Влияние экзогенных факторов на развитие АПК Белгородской области // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 137-144. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-137-144

INFLUENCE OF EXOGENOUS FACTORS ON DEVELOPMENT OF AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX IN BELGOROD REGION

© 2026 Kitaev Yu. A.^a✉, Kitaeva O. V.^a, Aleynik E. S.^b

^aSaint Petersburg State Agrarian University
(Pushkin, Russian Federation)

^bBelgorod State Agrarian University named after V.Ya. Gorin
(Mayskiy settlement, Russian Federation)

✉ yurgenk@inbox.ru

Abstract. Central Black Earth region accounts for 16.3% of agricultural output, accounting for only 6.0% of agricultural land. According to Rosstat, Belgorod region alone produced 10.8% of the national livestock output in 2024. However, a negative trend of slowing agricultural production has emerged in this macroregion, despite the sector's overall growth nationwide, necessitating the identification of the factors exerting the negative impact. The scientific novelty of this study lies in the discovery of new empirical data demonstrating a strong correlation between agricultural production growth rates in the studied regions and producer prices, as well as the identification of a moderate dependence on export volumes. It has been established that, despite the overall growth of the agro-industrial complex in the Russian Federation, a negative trend of production decline is observed in a number of entities of Central Black Earth region. The peculiarity of Central Black Earth region's development is due to the fact that several of its constituent entities are border regions. In 2024, the growth rate of agricultural production in Central Black Earth region was 94.9%, while the national average was estimated at 106.7%. A significant impact of agricultural producer prices on the pace of industry development was revealed (the paired correlation coefficient was: Russian Federation - 0.86; Central Black Earth region - 0.67; Belgorod region - 0.70). No direct correlation was found between inflation processes and the pace of growth of the agro-industrial complex. The study found that agricultural exports demonstrate steady growth, reaching \$45 billion in 2024. Moreover,

the volume of imports and exports has an indirect effect on the development of agriculture. The practical significance of this work lies in the development of a set of measures to support agro-industrial complex, including financial and credit mechanisms and increasing the investment attractiveness of the industry in border areas.

Key words: Central Black Earth region, Belgorod region, production index, exogenous factors, inflation rate, key rate, price index, imports, exports, correlation.

For citation: Kitaev YuA, Kitaeva OV, Aleynik ES. [Influence of exogenous factors on development of agro-industrial complex in Belgorod region]. Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2026; Vol. 21. 1(81). 137-144 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-137-144

Введение. Агропромышленный комплекс является ключевой отраслью народного хозяйства, которая формирует до 10,0% ВВП страны и ежегодную экспортную выручку на уровне 40,0 млрд долларов. Кроме того, АПК участвует в создании цепочки стоимости более чем 80 отраслей и обеспечивает занятость 6,4 млн чел. [1, 2, 3]. В этих условиях кратно возрастает роль Центрально-Черноземного экономического района, и Белгородской области, объем производства сельскохозяйственной продукции в которой в 2024 году составил 367,5 млрд руб. (3 место в РФ) [4, 5]. Развитие агропромышленного производства Российской Федерации и ее субъектов осуществляется в жестких конкурентных условиях и, начиная с 2014 года, под непрерывным воздействием санкционного воздействия [6, 7]. Это во многом предопределяет и тенденции развития анализируемой отрасли. Следовательно, есть основания предполагать, что на развитие агропромышленного комплекса оказывают влияние различные экзогенные факторы. И если в целом по стране отмечается тенденция роста, то в ряде субъектов РФ, входящих в состав ЦЧР сложилась негативная тенденция снижения объема производства [8, 9]. В связи с этим считаем необходимым выявить причины замедления развития агропромышленного производства в Центрально-Черноземном регионе и в Белгородской области.

Условия, материалы и методы. Оценка влияния экзогенных факторов на развитие агропромышленного комплекса Российской

Федерации, Центрально-Черноземного региона и Белгородской области основывается на статистических данных, представленных в Единой межведомственной информационно-статистической системе (ЕМИСС) с применением экономико-статистических методов. Исследования проводились с использованием статистических данных за 2007-2024 года, что обеспечивает достоверность анализа динамических рядов. Для оценки темпа роста АПК РФ, макрорегиона и исследуемого субъекта применялся индексный метод. Оценка тесноты связи между массивами данных основывается на корреляционном анализе. Тенденция темпа роста импорта и экспорта установлена с применением инструментов регрессионного анализа.

Результаты и обсуждение. Замедление развития АПК представляет собой одну из главных проблем современной национальной экономики, требующее незамедлительного решения в силу того, что наряду с вопросами продовольственной безопасности, агропромышленный комплекс обеспечивает экономическую стабильность сельскохозяйственных регионов и напрямую связана с занятостью сельского населения. Наряду с эндогенными факторами, такими как инфраструктурные ограничения, кадровый дефицит в отрасли, технологическая зависимость, в условиях санкционного ограничения стала увеличиваться роль факторов экзогенных. Представленные на рисунке 1 данные наглядно свидетельствуют о замедлении развития АПК.

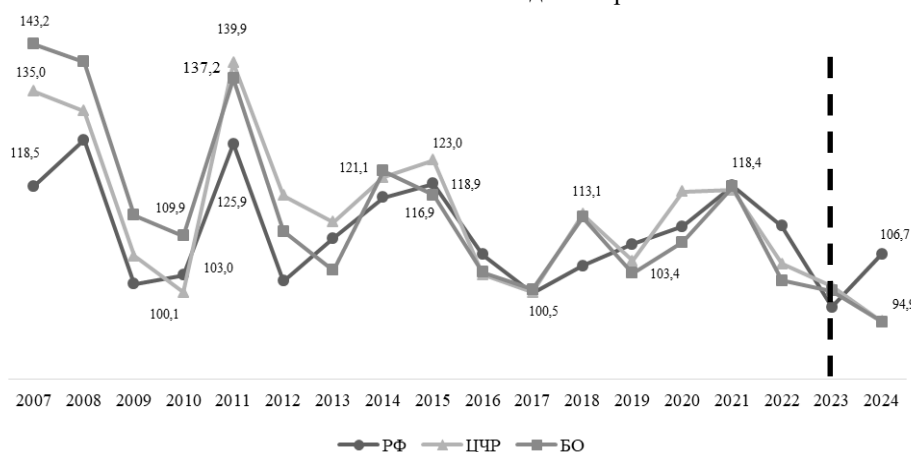


Рис. 1 – Динамика индекса производства продукции сельского хозяйства хозяйствами всех категорий в РФ, ЦФО и в Белгородской области (2007-2024 годы), % [10]

Fig. 1 — Dynamics of the agricultural production index by all categories of farms in the Russian Federation, the Central Federal District (CFD), and the Belgorod Oblast (2007–2024), % [10]

Главным экономическим фактором замедления роста АПК в 2008 году стал мировой финансовый кризис, который сопровождался

сокращением инвестиций в сектор, ростом стоимости кредитных ресурсов и снижение покупательской способности населения [11, 12].

В период с 2014 года по настоящее время главным ограничителем роста агропромышленного производства стали санкционные ограничения, экономические санкции и падение курса рубля на фоне острого кадрового дефицита в отрасли [13]. Вместе с тем, следует отметить, что за анализируемый период 2007-2023 года динамика развития АПК страны в целом, ведущих макрорегионов и отдельных субъектов была синхронизирована и отличалась только интенсивностью. Однако, начиная с 2024 года на фоне положительной тенденции роста объема производства продукции сельского хозяйства в Российской Федерации, в ЦФО и в

Белгородской области продолжился спад, который начался в 2021 году.

Детальный поквартальный анализ индекса производства позволяет отметить, что расхождение происходит начиная с третьего квартала 2024 года (рис. 2). Если в целом по стране в третьем квартале 2024 году индекс производства продукции сельского хозяйства составил 102,3 %, то в ЦФР, где три из пяти входящих областей являются приграничными, и в Белгородской области наметилась тенденция сокращения производства и темп роста составил 95,4%, а к концу четвертого квартала он снизился до 67,9%.

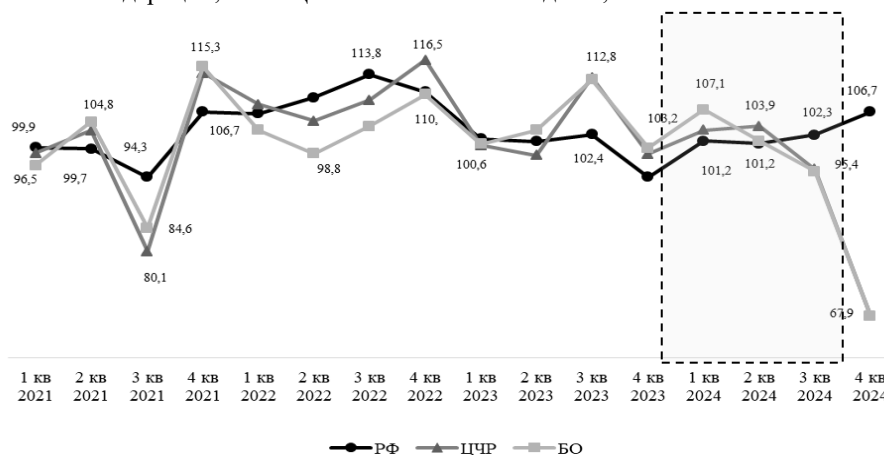


Рис. 2 – Динамика поквартального индекса производства продукции сельского хозяйства хозяйствами всех категорий в РФ, ЦФО и в Белгородской области (2011-2024 годы), % [14]
Fig. 2 — Dynamics of the quarterly agricultural production index by all categories of farms in the Russian Federation, the Central Federal District (CFD), and the Belgorod Oblast (2011–2024), % [14]

Данная тенденция является крайне негативной и непосредственно выявление факторов, оказывающих негативное влияние на АПК исследуемого региона является первоочередной задачей, поскольку позитивное развитие агропромышленного производства ни в исследуемой Белгородской области, ни в Центрально-Черноземном регионе в сложившихся условиях не представляется возможным.

Одними из ключевых показателей, оказывающих влияние на экономическую эффективность сельскохозяйственных предприятий

и характеризующих состояние национальной финансово-кредитной системы, являются уровень инфляции и размер ключевой ставки. В целом, на основании анализа за 2007-2024 года, можно говорить, что уровень инфляции превышал ключевую ставку в 2014-2015 годы и в 2021-2022 годы, что связано с необходимостью поддержки национальной экономики. При этом в 2023 году отмечен рост ключевой ставки на 8,5 п.п. и в 2024 году на 5,0 п.п. до 21,0%.

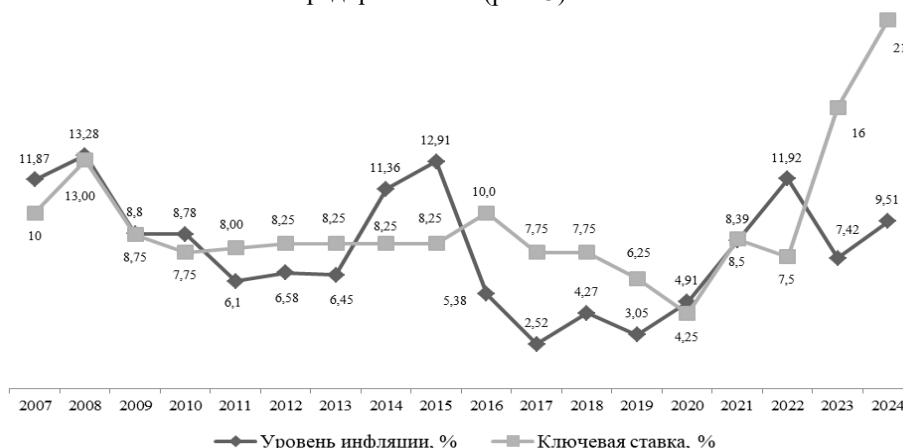


Рис. 3 – Динамика уровня инфляции и ключевой ставки в Российской Федерации (2007-2024 годы), % [15]

Fig. 3 — Dynamics of inflation rate and key interest rate in the Russian Federation (2007–2024), % [15]

Вместе с тем, при всей значимости вышеназванных макроэкономических экзогенных факторов, статистически достоверной связи между темпом роста

объемов производства продукции сельского хозяйства и уровнем инфляции и ключевой ставки, выявлено не было (табл. 1).

Таблица 1 – Оценка тесноты связи между динамикой развития агропромышленного комплекса, уровнем инфляции и уровнем ключевой ставки ЦБ РФ (2007-2024 годы)

Table 1 – Assessment of the strength of relationship between the dynamics of agro-industrial complex development, inflation rate, and the key interest rate of the Bank of Russia (2007–2024)

№ п/п	Объект исследования	Значение коэффициента корреляции
1. Уровень инфляции, %		
1.1	Российская Федерация	0,44
1.2	Центрально-Черноземный регион	0,35
1.3	Белгородская область	0,51
2. Ключевая ставка ЦБ РФ, %		
2.1	Российская Федерация	-0,12
2.2	Центрально-Черноземный регион	-0,22
2.3	Белгородская область	-0,08

Также значительное влияние на экономическую эффективность деятельности хозяйствующих субъектов оказывает цена реализации сельскохозяйственной продукции, которая складывается на мировом, национальном и отдельных отраслевых рынках. Как мы можем отметить, отраслевые

цены на сельскохозяйственную продукцию подвержены существенным колебаниям (рис. 4). Отдельного внимания заслуживает тот факт, что колеблемость индекса цен на продукцию растениеводства существенно больше, чем на продукцию животноводства.

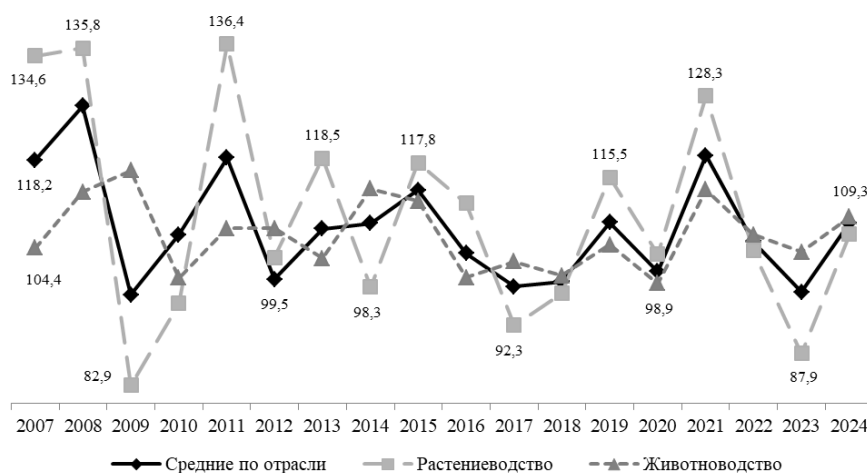


Рис. 4 – Индекс цен производителей сельскохозяйственной продукции в Российской Федерации (2007-2024 годы), % [16]

Fig. 4 — Producer price index for agricultural products in the Russian Federation (2007–2024), % [16]

Проведенный расчет тесноты связи между темпом роста производства продукции сельского хозяйства и индексом цен производителей сельскохозяйственной продукции показал

высокую степень тесноты связи как в целом по Российской Федерации, так и по Центрально-Черноземному региону, так и по Белгородской области (табл. 2).

Таблица 2 – Оценка тесноты связи между динамикой развития агропромышленного комплекса и индексом цен производителей сельскохозяйственной продукции (2007-2024 годы)

Table 2 — Assessment of the strength of relationship between the dynamics of agro-industrial complex development and the producer price index for agricultural products (2007–2024)

№ п/п	Объект исследования	Значение коэффициента корреляции
1	Российская Федерация	0,86
2	Центрально-Черноземный регион	0,67
3	Белгородская область	0,70

После введения первых пакетов экономических санкций в Российской Федерации структура импорта и экспорта претерпела радикальную трансформацию, выраженную в смене ключевых торговых партнеров и

изменения товарных потоков. Основным трендом стало снижение доли стран ЕС и США при одновременном росте значимости Китая, Индии и Турции. С 2015 года сельское хозяйство начинает играть роль не только отрасли

обеспечивающей внутреннюю продовольственную безопасность страны, но и приобретает статус стратегической экспортоориентированной [17, 18, 19]. А после 2022 года агропромышленное производство становится одним из самых устойчивых сегментов российской экономики. Несмотря на санкционное воздействие Россия сохранила статус нетто-экспортера продовольствия, при этом до 80,0% продукции реализуется на рынки

Ближнего Востока, Африки, Китая и Индии. Объем экспорта сельскохозяйственной продукции за 2007-2024 годы демонстрирует устойчивый рост. Заметно резкое увеличение экспорта в 2019-2021 годы, когда показатели выросли с 25,5 млрд долларов до 37,7 млрд долларов. В 2022 году экспорт достиг 43,5 млрд долларов, а в 2024 году, по официальным данным, составил около 45 млрд долларов США (рис. 5).

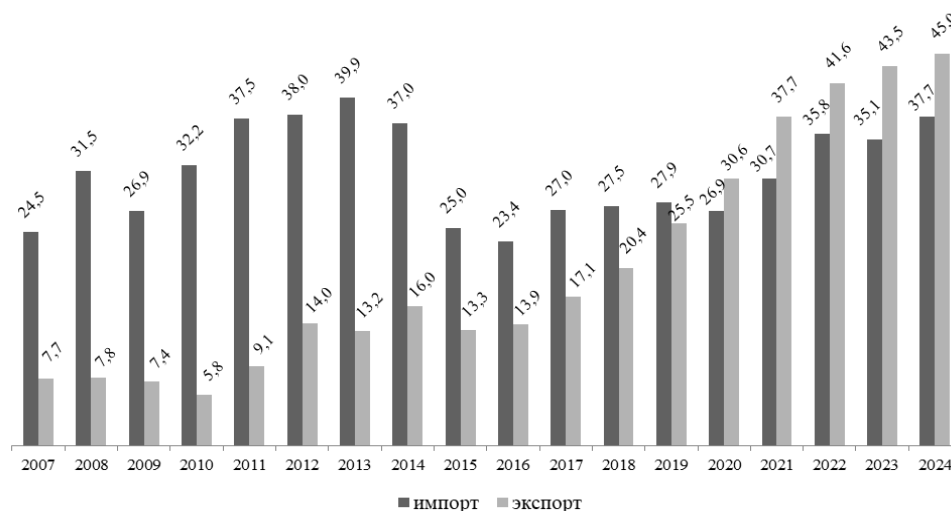


Рис. 5 – Объем импорта и экспорта сельскохозяйственной продукции и продовольствия в Российской Федерации (2007-2024 годы), % [20]

Fig. 5 — Volume of imports and exports of agricultural products and food in the Russian Federation (2007–2024), % [20]

Импорт также имеет тенденцию роста. Особенно заметен рост импорта с 2007 года по 2011 год, с 24,5 млрд долларов до 39,9 млрд долларов. После небольшого снижения в 2012-2014 годы, импорт снова начал расти и достиг уровня 37,7 млрд долларов в 2021 году и 41,6 млрд долларов в 2022 году.

В целом, можно сделать вывод, что динамика экспорта демонстрирует более устойчивую тенденцию роста, вследствие чего начиная с 2020 года в агропромышленном

секторе Российской Федерации сложился положительный внешнеторговый баланс.

Несмотря на важность импортно-экспортных операций как экзогенного фактора развития агропромышленного производства страны, макрорегиона и отдельного субъекта, анализ тесноты связи между темпом роста объема импорта и экспорта и темпом развития АПК исследуемых объектов, статистически достоверной связи не показал (табл. 3).

Таблица 3 – Оценка тесноты связи между динамикой развития агропромышленного комплекса и темпом роста импорта и экспорта (2007-2024 годы)

Table 3 — Assessment of the strength of relationship between the dynamics of agro-industrial complex development and the growth rate of imports and exports (2007–2024)

№ п/п	Объект исследования	Значение коэффициента корреляции
1. Динамика темпа роста объема экспорта сельскохозяйственной продукции и продовольствия, %		
1.1	Российская Федерация	0,37
1.2	Центрально-Черноземный регион	0,58
1.3	Белгородская область	0,49
2. Динамика темпа роста объема импорта сельскохозяйственной продукции и продовольствия, %		
2.1	Российская Федерация	0,21
2.2	Центрально-Черноземный регион	0,22
2.3	Белгородская область	0,40

Следовательно, объем импорта и экспорта не оказывают прямого воздействия на развитие сельского хозяйства, а влияют опосредованно и являются факторами второго порядка.

Проведенный экономико-статистический анализ влияния экзогенных факторов на

развитие агропромышленного комплекса Белгородской области позволил определить приоритетные направления развития регионального АПК и предложить комплекс мер, направленных на противодействие выявленным негативным факторам по направлениям:

- финансово-кредитные меры, которые включают субсидирование кредитов и льготное кредитование сельскохозяйственных организаций региона, деятельность которых ограничена ввиду физической небезопасности хозяйственной деятельности или потребовала дополнительных затрат для обеспечения безопасности персонала организации (средства личной защиты, обустройство убежищ и т.д.);

- инвестиционные меры, которые предполагают создание привлекательных для инвесторов условий в агропромышленном комплексе региона. В частности, действие свободной экономической зоны, созданной на территории Белгородской области, следует расширить на сельскохозяйственных товаропроизводителей и на смежные производства.

Выводы. На основании проведенного первичного анализа влияния экзогенных

факторов на динамику развития агропромышленного комплекса страны, ЦЧР и Белгородской области установлено, что наиболее значимое воздействие на развитие оказывают цены производителей сельскохозяйственной продукции. Выявлена статистически достоверная прямая тесная связь между темпом роста объема производства сельскохозяйственной продукции и ценами производителей. Умеренная связь отмечается между темпом роста объема производства сельскохозяйственной продукции и объемом экспорта продовольствия. Выявленные закономерности позволяют утверждать, что вопросы управления развитием АПК требуют глубокого качественного анализа и разработки комплекса мер, направленных на противодействие выявленным негативным тенденциям.

Литература

1. Валиева Д. Г., Гасанов А.Д., Эминова Э.М. Институциональный фактор устойчивого развития АПК // Экономика и предпринимательство. 2020. № 7(120). С. 535-540. doi: 10.34925/EIP.2020.120.7.110.
2. Развитие агропродовольственного сектора России в условиях современных вызовов / Закшевский В.Г., Богомолова И.П., Васильенко И.Н., Ибрагимов Оглы Р.И. // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2025. № 1(119). С. 20-31. doi: 10.33938/251-20.
3. Алпатов А. В. Структурно-отраслевая политика и пространственное развитие АПК в условиях новой геополитической обстановки // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2025. № 7(125). С. 100-112. doi: 10.33938/257-100.
4. Китаев Ю. А., Сидоренко А.А., Алейник Е.С. Особенности развития агропромышленного комплекса Белгородской области // Современная экономика: проблемы и решения. 2023. № 10(166). С. 6-18. doi: 10.17308/meps/2078-9017/2023/10/6-18.
5. Экономическое развитие регионов Центрального Черноземья / Наджафова М.Н., Головин А.А., Семёрова О.С., Толстых И.В. // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 2. С. 177-182.
6. Чаткина Е. Анализ риск-факторов и оценка устойчивости развития АПК в условиях санкций // Финансы: теория и практика. 2024. Т. 28. № 2. С. 166-177. doi: 10.26794/2587-5671-2024-28-2-166-177.
7. Ахметов В.Я., Низамутдинов М.М. Влияние факторов и санкций на социальное развитие сельских региональных систем // Экономика сельского хозяйства России. 2024. № 3. С. 122-133. doi: 10.32651/243-122.
8. Организационно-экономические основы функционирования молочного скотоводства в условиях санкционного воздействия / Китаев Ю.А., Гайдаенко А.А., Ужик В.Ф., Китаева О.В. // Экономика сельского хозяйства России. 2023. 12. С. 82-88. doi: 10.32651/2312-82.
9. Юсупов В. Р. О корректировке Стратегии развития АПК в современных условиях частичной мобилизации экономики России // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2023. № 3(97). С. 65-70. doi: 10.33938/233-65.
10. Продукция сельского хозяйства в фактически действовавших ценах (окончательные данные) Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/43337> (дата обращения: 25.04.2025).
11. Alhassan A., Sabzehmeidani A. Sh., Taha A. I., Haseki M. I Sanctions and economic growth: Do sanction diversity and level of development matter? // Heliyon. 2023. Vol. 9, №. 9. P. e19571. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e19571.
12. Okonkwo N., Eze P. Rethinking the use of sanctions by United Nations and state behaviour: implications for peace and development // International Journal of Social Sciences and Management Review. 2024. Vol. 07, № 06. P. 344-354. doi: 10.37602/ijssmr.2024.7613.
13. Маслова В. В., Зарук Н.Ф., Романцева Ю.Н. Влияние факторов спроса и предложения на формирование ценовых отношений в АПК России // Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2025. № 11 (130). С. 71-83. doi: 10.33938/2511-71.
14. Индексы производства продукции сельского хозяйства Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС) [Электронный ресурс] URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/34128> (дата обращения: 23.04.2025).
15. Инфляция и ключевая ставка Банка России [Электронный ресурс]. URL: https://www.cbr.ru/hd_base/inf/ (дата обращения: 25.04.2025).
16. Индекс цен производителей сельскохозяйственной продукции [Электронный ресурс]. URL: <https://new.cisstat.org/web/guest/cis-stat-home?iframeId=43368> (дата обращения: 21.04.2025).
17. Трифонова Е. Н. Оценка факторов, влияющих на экспорт продовольствия российских регионов // Экономика региона. 2023. Т. 19. № 4. С. 1209-1223. doi: 10.17059/ekon.reg.2023-4-19.
18. Терновский Д. С. Российский аграрный экспорт: экономико-статистический анализ // Вопросы статистики. 2023. Т. 30. № 6. С. 21-34. doi: 10.34023/2313-6383-2023-30-6-21-34.
19. Günay H. The Common Agricultural and Food Policy of the European Union: An Assessment of its Framework, Stages and Regulations // International Journal of Gastronomy Research. 2024. doi: 10.56479/ipeak.2024.01161.

20. Внешняя торговля России сельхозсырьем и продовольствием: сравнительный анализ экспорта и импорта [Электронный ресурс]. URL: <https://ab-centre.ru/news/vneshnyaya-torgovlya-rossii-selhozsyrem-i-prodovolstviem-sravnitelnyy-analiz-eksporta-i-importa> (дата обращения: 21.04.2025).

References

1. Valieva DG, Gasanov AD, Eminova EM. [Institutional factor of sustainable development of agro-industrial complex]. *Ekonomika i predprinimatelstvo*. 2020; 7(120). 535-540 p. doi: 10.34925/EIP.2020.120.7.110.
2. Zakshevskiy VG, Bogomolova IP, Vasilenko IN, Ibragimov Ogly RI. [Development of Russian agro-food sector in the context of modern challenges]. *Ekonomika, trud, upravlenie v selskom khozyaystve*. 2025; 1(119). 20-31 p. doi: 10.33938/251-20.
3. Alpatov AV. [Structural-sectoral policy and spatial development of agro-industrial complex in the context of new geopolitical situation]. *Ekonomika, trud, upravlenie v selskom khozyaystve*. 2025; 7(125). 100-112 p. doi: 10.33938/257-100.
4. Kitaev YuA, Sidorenko AA, Aleynik ES. [Features of agro-industrial complex development of Belgorod region]. *Sovremennaya ekonomika: problemy i resheniya*. 2023; 10(166). 6-18 p. doi: 10.17308/meps/2078-9017/2023/10/6-18.
5. Nadzhafova MN, Golovin AA, Semerova OS, Tolstykh IV. [Economic development of the regions of Central Black Earth region]. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii*. 2022; 2. 177-182 p.
6. Chatkina E. [Risk factors analysis and assessment of the sustainability of agro-industrial complex development under sanctions]. *Finansy: teoriya i praktika*. 2024; Vol.28. 2. 166-177 p. doi: 10.26794/2587-5671-2024-28-2-166-177.
7. Akhmetov VYa, Nizamutdinov MM. [The influence of factors and sanctions on the social development of rural regional systems]. *Ekonomika selskogo khozyaystva Rossii*. 2024; 3. 122-133 p. doi: 10.32651/243-122.
8. Kitaev YuA, Gaydaenko AA, Uzhik VF, Kitaeva OV. [Organizational and economic foundations of dairy cattle farming under sanctions]. *Ekonomika selskogo khozyaystva Rossii*. 2023; 12. 82-88 p. doi: 10.32651/2312-82.
9. Yusupov VR. [On adjusting the Strategy for agro-industrial complex development in the current conditions of partial mobilization of the Russian economy]. *Ekonomika, trud, upravlenie v selskom khozyaystve*. 2023; 3(97). 65-70 p. doi: 10.33938/233-65.
10. Agricultural output at current prices (final data). [Internet]. Unified Interdepartmental Information and Statistical System (EMISS). [cited 2025, April 25]. Available from: <https://www.fedstat.ru/indicator/43337>.
11. Alhassan A, Sabzehmeidani AS, Taha AI, Haseki MI. Sanctions and economic growth: Do sanction diversity and level of development matter? *Heliyon*. 2023; Vol.9. 9. e19571 p. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e19571.
12. Okonko N, Eze P. Rethinking the use of sanctions by United Nations and state behaviour: implications for peace and development. *International Journal of Social Sciences and Management Review*. 2024; Vol.07. 06. 344-354 p. doi: 10.37602/ijssmr.2024.7613.
13. Maslova VV, Zaruk NF, Romantseva YuN. [Influence of supply and demand factors on the formation of price relations in the Russian agro-industrial complex]. *Ekonomika, trud, upravlenie v selskom khozyaystve*. 2025; 11(130). 71-83 p. doi: 10.33938/2511-71.
14. Agricultural production indices. [Internet]. Unified Interdepartmental Information and Statistical System (EMISS). [cited 2025, April 23]. Available from: <https://www.fedstat.ru/indicator/34128>.
15. Inflation and key rate of the Bank of Russia. [Internet]. Central Bank of the Russian Federation. [cited 2025, April 25]. Available from: https://www.cbr.ru/hd_base/inf/.
16. Agricultural producer price index. [Internet]. Interstate Statistical Committee of the Commonwealth of Independent States. [cited 2025, April 21]. Available from: <https://new.cisstat.org/web/guest/cis-stat-home?iframeId=43368>.
17. Trifonova EN. [Assessment of factors influencing food exports of Russian regions]. *Ekonomika regiona*. 2023; Vol.19. 4. 1209-1223 p. doi: 10.17059/ekon.reg.2023-4-19.
18. Ternovskiy DS. [Russian agricultural exports: economic and statistical analysis]. *Voprosy statistiki*. 2023; Vol.30. 6. 21-34 p. doi: 10.34023/2313-6383-2023-30-6-21-34.
19. Gunay H. The common agricultural and food policy of the European Union: an assessment of its framework, stages and regulations. *International Journal of Gastronomy Research*. 2024. doi: 10.56479/ipeak.2024.01161.
20. Russia's foreign trade in agricultural raw materials and food: a comparative analysis of exports and imports. [Internet]. Expertise and Analytical Center for Agribusiness. [cited 2025, April 21]. Available from: <https://ab-centre.ru/news/vneshnyaya-torgovlya-rossii-selhozsyrem-i-prodovolstviem-sravnitelnyy-analiz-eksporta-i-importa>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Китаев Юрий Александрович - доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры организации аграрного производства и менеджмента Санкт-Петербургского государственного аграрного университета (196601, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, г Пушкин, ш. Петербургское, д. 2, литера а) e-mail: yurgenk@inbox.ru, ORCID 0000-0001-5339-7425

Китаева Оксана Владимировна - доктор технических наук, доцент, профессор технических систем в агробизнесе Санкт-Петербургского государственного аграрного университета (196601, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, г Пушкин, ш. Петербургское, д. 2, литера а), e-mail: oksanauzik@mail.ru, ORCID 0000-0002-0058-9164

Алейник Евгений Станиславович – аспирант кафедры экономики Белгородского государственного аграрного университета имени В.Я. Горина (308503, Российская Федерация, Белгородская область, р-н Белгородский, п. Майский, ул. Вавилова, д. 1), e-mail: aleynikes@gmail.com, ORCID 0009-0009-9634-8952

Вклад авторов:

Ю.А. Китаев – формулирование идеи, постановка целей и задач исследования, критический пересмотр и редактирование текста, научное руководство, надзор за исследованием;

О.В. Китаёва – разработка методологии, создание моделей, статистический, математический или иной формальный анализ данных, подготовка графиков, диаграмм, визуализация данных;
 Е.С. Алейник – проведение экспериментов, сбор данных, подготовка первоначального варианта текста, управление данными, аннотирование, очистка и хранение данных.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 12.05.2025; одобрена после рецензирования 10.03.2026; принята к публикации 01.04.2026.

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

Authors:

Kitaev Yuriy Aleksandrovich - Doctor of Economics, Associate Professor, Professor of Agricultural Production and Management Department Saint Petersburg State Agrarian University (Peterburgskoe Shosse, 2, litera A, Pushkin, Saint Petersburg, 196601, Russian Federation), e-mail: yurgenk@inbox.ru, ORCID 0000-0001-5339-7425

Kitaeva Oksana Vladimirovna - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Technical Systems in Agribusiness Saint Petersburg State Agrarian University (2 Peterburgskoe Shosse, litera A, Pushkin, Saint Petersburg, 196601, Russian Federation), e-mail: oksanauzik@mail.ru, ORCID 0000-0002-0058-9164

Aleynik Evgeniy Stanislavovich – post-graduate student of Economics Department Belgorod State Agrarian University named after V.Ya.Gorin (1 Vavilova Street, Maysky Settlement, Belgorodsky District, Belgorod Oblast, 308503, Russian Federation), e-mail: aleynikes@gmail.com, ORCID 0009-0009-9634-8952

Contribution of the authors:

Y.A. Kitaev – Idea formulation, Setting research goals and objectives, Critical review and text editing, Scientific supervision and oversight of the research;

O.V. Kitaeva – Methodology development, Model creation, Statistical, mathematical, or other formal data analysis, Preparation of graphs, charts, and data visualization;

E.S. Aleynik – Conducting experiments, Data collection, Drafting the initial text, Data management, Annotation, Data cleaning, and storage.



The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 12.05.2025; revised 10.03.2026; accepted 01.04.2026.

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭФИРОМАСЛИЧНОЙ ОТРАСЛИ В УСЛОВИЯХ ГОРНОЙ ЗОНЫ РСО-АЛАНИЯ

© 2026 Козырев А. Х. ✉, Кайтов А. А.

*Северо-Кавказский научно-исследовательский институт горного и предгорного сельского хозяйства – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук» (СКНИИГПСХ ВНЦ РАН)
(с. Михайловское, Российская Федерация)
✉ ironlag@mail.ru*

Реферат. Мировое производство эфиромасличных культур демонстрирует стабильный рост, что обусловлено возрастающим спросом потребителей на натуральные и органические продукты. В России возделывание эфиромасличных культур является неотъемлемой частью отечественного земледелия, однако, несмотря на историческую значимость и потенциал развития отрасли, доля России в мировом производстве составляет лишь около 2-3%. При этом, территория страны пригодна для выращивания около трети всех эфиромасличных культур в мире. Начиная с 2014 года, Россия значительно увеличила посевные площади выращивания эфиромасличных культур (с 38 до 107 тыс. га). Это оказало положительное влияние на объемы производства семян эфироноров (рост с 36 до 115 тыс. тонн) и экономическую привлекательность данной отрасли. Для обеспечения устойчивого развития эфиромасличной отрасли требуется рациональное использование земельных ресурсов, уделяя при этом особое внимание вовлечению в сельскохозяйственный оборот неосвоенных и малоиспользуемых территорий, площадь которых в России составляет 43,3 млн га, из них на сельскохозяйственные угодья приходится 31,8 млн га (73,4%). Горные и склоновые зоны РСО-Алания, обладают значительным потенциалом для выращивания эфиромасличных культур, благодаря своим уникальным климатическим и почвенным условиям. Такие эфироноры, как базилик, эстрагон, тимьян, лаванда и другие ароматические травы, обладают высокой адаптацией к засушливым и труднопригодным для традиционного земледелия почвам. Развитие эфиромасличного производства на основе рационального землеустройства в Республике Северная Осетия – Алания позволит оптимизировать использование сельскохозяйственных земель, повысить их продуктивность, предотвратить деградацию почв и повысить экологическую устойчивость агроландшафтов, значительно укрепить аграрный потенциал региона, повысить его инвестиционную привлекательность и обеспечит долгосрочное устойчивое развитие отрасли.

Ключевые слова: эфиромасличная отрасль, эфироноры, горная зона, неиспользуемые земли, рациональное землеустройство, устойчивое развитие.

Для цитирования: Козырев А.Х., Кайтов А.А. Проблемы и перспективы развития эфиромасличной отрасли в условиях горной зоны РСО-Алания // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 145-154. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-145-154

PROBLEMS AND PROSPECTS FOR ESSENTIAL OIL INDUSTRY DEVELOPMENT IN THE MOUNTAINS ZONE OF THE REPUBLIC OF NORTH OSSETIA-ALANIA

© 2026 Kozyrev A. Kh. ✉, Kaytov A. A.

*North Caucasus Research Institute of Mountain and Foothill Agriculture - Branch of Federal State Budgetary Scientific Institution of Science, Federal Scientific Center "Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences" (SKNIIGPSH VSC RAS)
(Mikhaylovskoe village, Russian Federation)
✉ ironlag@mail.ru*

Abstract. Global production of essential oil crops is demonstrating stable growth, driven by increasing consumer demand for natural and organic products. In Russia, the cultivation of essential oil crops is an integral part of domestic agriculture, however, despite the historical significance and potential for development, Russia's share of global production is only approximately 2-3%. Meanwhile, the country's territory is suitable for growing approximately one-third of all essential oil crops worldwide. Since 2014 Russia has significantly increased the area under essential oil crop cultivation (from 38 000 to 107 000 hectares). This had a positive impact on the production of essential oil seeds (an increase from 36 000 to 115 000 tons) and the economic attractiveness of this industry. Sustainable development of the essential oil industry requires rational use of land resources, with particular attention to the integration of undeveloped and underutilized lands into agricultural production. Russia's 43.3 million hectares of land, of which 31.8 million hectares (73.4%) are agricultural lands, are located in the mountainous and slope areas of the Republic of North Ossetia-Alania. The

unique climate and soil conditions of the Republic of North Ossetia-Alania offer significant potential for essential oil crops cultivation. Essential oil plants such as basil, tarragon, thyme, lavender and other aromatic herbs are highly adaptable to arid soils unsuitable for traditional farming. Developing essential oil production based on rational land management in the Republic of North Ossetia-Alania will optimize agricultural land use, increase productivity, prevent soil degradation and enhance the environmental sustainability of agricultural landscapes. This will significantly strengthen the region's agricultural potential, enhance its investment attractiveness and ensure the long-term sustainable development of the industry.

Key words: essential oil industry, essential oil plants, mountainous zone, unused land, rational land management, sustainable development.

For citation: Kozyrev AKh, Kaytov AA. [Problems and prospects for essential oil industry development in the mountains zone of the Republic of North Ossetia-Alania]. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2026; Vol. 21. 1(81). 145-154 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-145-154

Введение. В условиях глобальных геополитических и геоэкономических вызовов восстановление и развитие эфиромасличной отрасли России приобретает особую значимость, выступая драйвером для различных секторов экономики [1, 2]. Отрасль не только способствует обеспечению внутреннего рынка качественным сырьем для пищевой, парфюмерно-косметической, фармацевтической и других отраслей [3], но и играет ключевую роль в укреплении экономической устойчивости, содействуя импортозамещению, технологической независимости и увеличению экспортного потенциала страны.

Особое внимание должно быть уделено расширению существующих и созданию новых промышленных локаций для выращивания эфиромасличных культур (эфироносов), что обусловлено рядом факторов. Во-первых, увеличение посевных площадей и расширение производственных мощностей способствуют созданию новых рабочих мест в регионах, что, в свою очередь, ведёт к улучшению уровня жизни местного населения и активному развитию инфраструктуры. Во-вторых, диверсификация производства позволяет расширить и усовершенствовать технологии возделывания не только традиционных эфироносов (лаванда, мята, кориандр, тмин, фенхель, тимьян), но и новых востребованных культур (розмарин, шалфей, Melissa, базилик, эстрагон), способствуя повышению добавленной стоимости и конкурентоспособности получаемой продукции на внутреннем и международном рынках. В-третьих, эфиромасличные растения играют ключевую роль в устойчивом и экологически чистом сельском хозяйстве, обеспечивая его долгосрочную устойчивость [4]. Эфироносы помогают восстанавливать баланс питательных веществ в почве, уменьшать её деградацию и поддерживать биоразнообразие [5].

Тем не менее, на сегодняшний день технологии возделывания и переработки эфиромасличных культур остаются слабо развитыми и занимают относительно небольшую долю в сельскохозяйственном производстве, даже в традиционных районах их выращивания, включая Алтайский край, Краснодарский край, Ставропольский край и Республика Крым, поскольку в отрасли наблюдается низкий уровень автоматизации процессов,

ограниченность научно-технической базы, а также нехватка инвестиций. Кроме того, отсутствие современной инфраструктуры для переработки сырья и неэффективная логистика затрудняют развитие этой сферы, что приводит к ограничению объёмов производства и снижению её рентабельности.

Значительным потенциалом для развития эфиромасличной отрасли обладают горные территории Республики Северная Осетия – Алания. Уникальные природно-климатические условия региона, благоприятный микроклимат и богатое биоразнообразие, создают предпосылки для выращивания высококачественного сырья. РСО-Алания демонстрирует тенденции развития эфиромасличного производства, которые в целом соответствуют общероссийским. Однако регион имеет свои специфические особенности и проблемы, которые требуют более детального рассмотрения.

Цель исследования – оценить современное состояние эфиромасличной отрасли в России, выявив ключевые проблемы и тенденции ее развития в условиях горной зоны Республики Северная Осетия – Алания, обосновав перспективные направления и возможности для ее эффективного роста с учетом природно-климатических, экономических и социальных особенностей региона.

Условия, материалы и методы. Методология исследования основана на теоретических и прикладных трудах российских ученых, нормативно-правовых актах РФ и данных Федеральной службы государственной статистики. Используются статистический и сравнительный анализы, обобщение, синтез и прогнозирование. Комплексный подход позволяет оценить текущее состояние эфиромасличной отрасли в РСО-Алания, выявить ключевые проблемы и тенденции, а также определить перспективные направления развития с учетом природно-климатических, экономических и социальных факторов.

Результаты и обсуждение. Как показало исследование, мировое производство эфиромасличных культур демонстрирует стабильный рост, что обусловлено возрастающим спросом потребителей на натуральные и органические продукты [6]. Объем мирового рынка эфиромасличной отрасли в 2023 году составил 11,23 млрд долларов США, а к 2031 году согласно прогнозным данным Global Essential

Oils Market, он вырастет до 23,40 млрд долларов США (при среднегодовом темпе роста 9,60% в период с 2024 по 2031 год) [7]. Значительную долю в мировом развитии технологий возделывания и переработки эфирносов занимают страны Северной и Южной Америки (Бразилия, США, Аргентина), обеспечивающие около 40% мирового объема производства, страны Азиатского региона (Индия, Китай, Пакистан) составляют около 30%, на Европейские страны (Франция,

Италия, Испания, Болгария, Турция и др.) приходится около 25% мирового объема (рис. 1).

В России возделывание эфиромасличных культур является неотъемлемой частью отечественного земледелия [8]. Однако, несмотря на историческую значимость и потенциал развития отрасли (территория страны пригодна для выращивания около трети всех эфиромасличных культур в мире), доля России в мировом производстве составляет лишь около 2-3%.

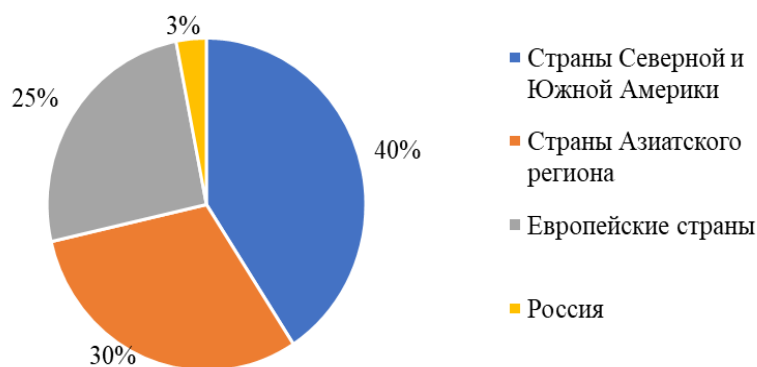


Рис. 1 – Доля стран в мировом производстве эфиромасличных культур, 2024 год, % [9]

Fig. 1 — Share of countries in global production of essential oil crops, 2024, % [9]

Начиная с 2014 года, Россия значительно увеличила посевные площади выращивания эфиромасличных культур, что оказало

положительное влияние на объемы производства и экономическую привлекательность данной отрасли (рис. 2).

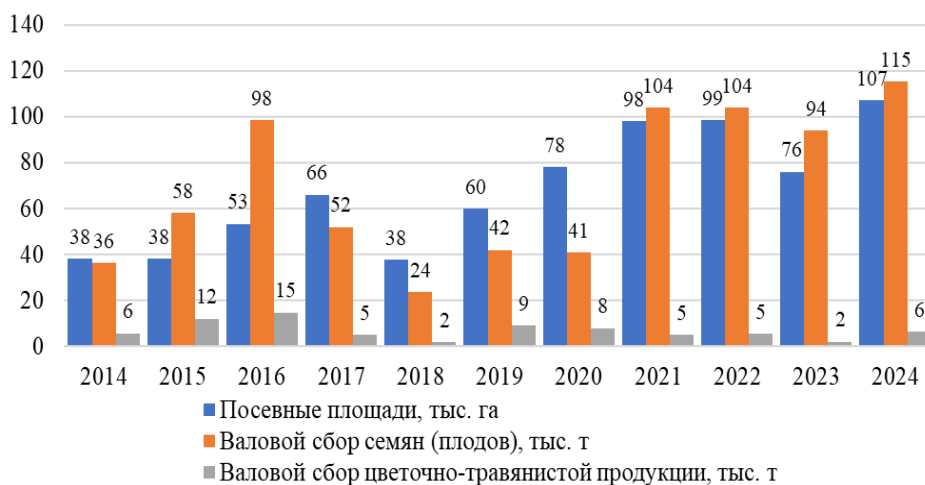


Рис. 2 – Динамика показателей эфиромасличной отрасли России [10]

Fig. 2 — Dynamics of indicators in the essential oil industry in Russia [10]

Анализ динамики посевных площадей и валового сбора эфиромасличных культур за период 2014-2024 годов подтверждает устойчивое развитие отрасли. Несмотря на отдельные периоды спада, отрасль демонстрирует высокую адаптивность к внешним вызовам, способность стабилизировать производство и реализовывать значительный потенциал.

Положительная динамика показателей отмечается во всех федеральных округах страны (табл. 1), что свидетельствует о системном характере роста и увеличении значимости эфиромасличных культур в агропромышленном секторе России.

Наблюдается значительное увеличение

посевных площадей эфиромасличных культур, особенно в Южном (ЮФО) и Северо-Кавказском (СКФО) федеральных округах. В 2024 году в ЮФО площадь посевов достигла 69,5 тыс. га, что в три раза превышает уровень 2014 года. В СКФО за тот же период площади возросли в четыре раза, достигнув 20 тыс.га. Существенный рост зафиксирован и в Приволжском федеральном округе (ПФО). Рост посевных площадей на Юге России связан как с развитием производства на «новых» территориях (Крым), так и с переориентированием многих сельхозтоваропроизводителей на новую более рентабельную отрасль.

Таблица 1 – Динамика показателей эфиромасличной отрасли по федеральным округам России [10]

Table 1 – Dynamics of indicators in the essential oil industry by federal districts of Russia [10]

Показатели	Период	Федеральный округ							
		ЦФО	СЗФО	ЮФО	СКФО	ПФО	УФО	СФО	ДФО
Посевная площадь, тыс. га	2014	1,0	-	23,3	5,0	8,7	-	-	-
	2016	2,8	0,2	24,4	17,6	8,0	-	0,3	-
	2018	0,2	1,7	25,5	4,6	4,9	-	0,4	0,3
	2020	1,7	0,8	49,2	17,0	8,4	-	0,5	0,4
	2022	2,3	1,0	64,8	19,0	10,2	0,2	0,3	0,7
	2024	2,5	1,2	69,5	20,0	12,1	0,4	0,5	1,1
Валовой сбор семян (плодов), тыс. тонн	2014	0,7	-	24,2	6,7	4,8	-	-	-
	2016	1,9	-	72,5	16,5	7,5	-	-	-
	2018	0,1	0,9	17,9	1,2	3,4	-	0,1	-
	2020	1,9	0,4	26,3	5,6	6,5	-	0,2	0,03
	2022	2,6	0,7	75,0	19,0	6,3	0,04	0,2	0,1
	2024	2,8	0,9	83,0	21,0	6,8	0,2	0,2	0,5
Валовой сбор цветочно-травянистой продукции, тыс. тонн	2014	0,2	-	5,2	0,2	0,1	-	-	-
	2016	5,7	-	7,4	0,2	1,5	-	-	-
	2018	-	-	1,6	0,01	0,03	-	-	-
	2020	-	-	7,6	0,2	0,11	-	-	-
	2022	-	-	5,3	-	-	-	-	-
	2024	-	-	5,5	0,3	0,4	-	-	-

Наибольший вклад в валовой сбор семян также принадлежит ЮФО, где объем производства вырос с 24,2 тыс. тонн в 2014 году до 83 тыс. тонн в 2024 году. В СКФО валовой сбор увеличился более чем в три раза – с 6,7 тыс. тонн до 21 тыс. тонн. Существенным фактором роста урожайности семян на Юге России стал опыт Крымских научных учреждений, для которых эфиромасличная отрасль является традиционной, и обмен опытом на межрегиональном уровне внёс определённые коррективы в развитие технологий возделывания этих культур. В Центральном (ЦФО) и Приволжском (ПФО) федеральных

округах показатели более скромные, но демонстрируют устойчивый рост.

Производство цветочно-травянистой продукции по-прежнему сосредоточено в ЮФО, где в 2024 году объем достиг 5,5 тыс. тонн, что лишь незначительно превышает показатель 2014 года (5,2 тыс. тонн). В СКФО и ПФО объемы производства этой категории продукции остаются невысокими – 0,3 тыс. тонн и 0,4 тыс. тонн соответственно.

Однако, несмотря на положительную динамику, объемы импорта эфиромасличной продукции по-прежнему значительно превышают экспорт (рис. 3).

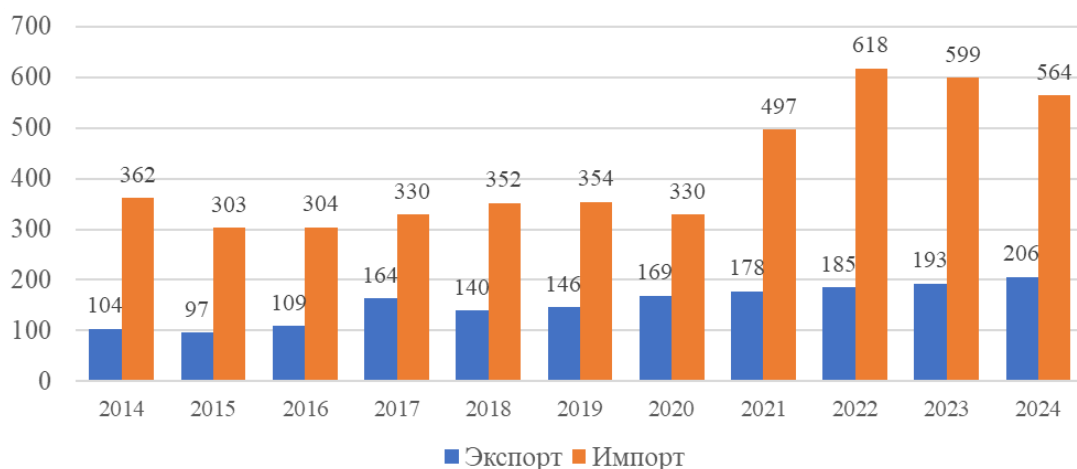


Рис. 3 – Динамика экспорта и импорта продукции эфиромасличной отрасли России [11]
Fig. 3 – Dynamics of exports and imports of products from the essential oil industry in Russia [11]

Возникает парадоксальная ситуация. Россия, обладая богатыми земельными и природно-климатическими ресурсами, вынуждена импортировать эфиромасличную продукцию, которую вполне способна выращивать на своей территории.

В целях обеспечения устойчивого развития эфиромасличной отрасли требуется рациональное использование земельных ресурсов, уделяя при этом особое внимание вовлечению

в сельскохозяйственный оборот неосвоенных и малоиспользуемых территорий. На 1 января 2024 года площадь неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения в стране составляет 43,3 млн га, из них на сельскохозяйственные угодья приходится 31,8 млн га (73,4%). Наибольшая доля таких территорий сосредоточена в Сибирском (СФО) (20,8%), Центральном (ЦФО) (20,5%) и Приволжском (ПФО) (20%) округах (рис. 4).

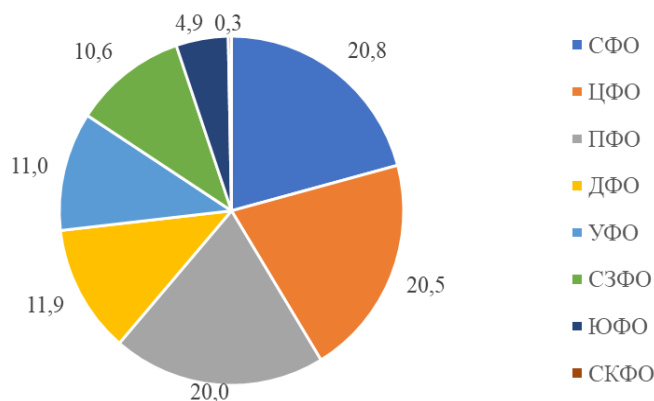


Рис. 4 – Доля неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения по федеральным округам РФ, на 01.01.2024 г., % [12]

Fig. 4 — Share of unused agricultural land by federal districts of the Russian Federation, as of 01.01.2024, % [12]

На Северо-Кавказский федеральный округ (СКФО) приходится всего лишь 0,3% неиспользуемых земель сельскохозяйственного назначения РФ, поскольку сельское хозяйство традиционно играет ключевую роль в экономике региона, а высокая плотность сельского населения способствует максимальному вовлечению земель в сельхозоборот. Кроме того, природно-географические особенности СКФО оказывают значительное

влияние на структуру землепользования. Горный рельеф региона накладывает ограничения на площади возделываемых земель, поэтому сельхозугодья используются рационально и с высокой степенью интенсификации. В результате даже относительно небольшие площади сельхозземель в регионе отличаются высокой продуктивностью и активно используются в аграрном секторе (табл. 2).

Таблица 2 - Распределение неиспользуемых сельскохозяйственных угодий земель сельскохозяйственного назначения в СКФО, 01.01.2024 г. [13]

Table 2 — Distribution of unused agricultural lands in the North Caucasian Federal District (NCFD), as of 01.01.2024 [13]

Субъект РФ	Общая площадь сельскохозяйственных угодий, тыс. га	Площадь неиспользуемых сельскохозяйственных угодий, тыс. га	Доля, %
Ставропольский край	5646,444	0,000	0
Республика Ингушетия	109,564	0,000	0
Кабардино-Балкарская Республика	621,662	0,000	0
Карачаево-Черкесская Республика	593,708	0,044	0,007
Республика Северная Осетия-Алания	102,440	7,270	7,10
Чеченская Республика	802,352	18,915	2,36
Республика Дагестан	3232,470	57,167	1,77
СКФО, всего	11108,64	83,396	0,75

Приведенные данные демонстрируют, что в большинстве регионов округа доля неиспользуемых угодий минимальна, а в Ставропольском крае, Ингушетии и Кабардино-Балкарии сельхозземли задействованы на 100%. Однако в отдельных субъектах наблюдаются резервы для расширения сельхозпроизводства. Наибольший объем неиспользуемых угодий отмечен в Республике Дагестан (57,2 тыс. га), Чеченской Республике

(18,9 тыс. га) и Северной Осетии-Алании (7,3 тыс. га), что связано со сложными природно-климатическими условиями, ограниченной инфраструктурой и особенностями ландшафта. При этом, в горных и степных районах региона наблюдаются высокие риски деградации земель, включая эрозию и дефляцию, которые усиливаются вследствие интенсивного земледелия и приводят к постепенному истощению почвы. Дополнительное негативное

воздействие оказывают процессы засоления, осолонцевания и переувлажнения, снижающие плодородие и продуктивность сельскохозяйственных земель. В таких условиях важно применять природоохранные агротехнологии, противоэрозионные мероприятия и адаптивные методы земледелия, позволяющие рационально использовать сельскохозяйственные ресурсы и минимизировать риски деградации почв.

Тем не менее, такие территории обладают значительным потенциалом для выращивания эфиромасличных культур. В частности, горные и склоновые зоны РСО-Алания, благодаря своим уникальным климатическим и почвенным условиям, являются перспективными локациями для культивирования специализированных сельскохозяйственных культур, не требующих высокоплодородных почв. Такие эфироносы, как базилик, эстрагон, тимьян, лаванда и другие ароматические травы, обладают высокой адаптацией к засушливым и труднопригодным для традиционного земледелия почвам. Их возделывание не только позволяет рационально использовать деградированные земли, но и обеспечит производство востребованной на внутреннем и внешнем рынках продукции. Кроме того, возделывание эфиромасличных культур в горных районах

РСО-Алания обладает рядом значительных преимуществ. Уникальные экологические и агрономические условия этих территорий создают благоприятную среду для роста таких растений, способствуя их высокой продуктивности и качеству. Применение специфических агротехнических методов, а также использование местных сортов, адаптированных к климатическим особенностям региона, не только улучшает состояние почв, но и повышает их плодородие за счет естественного восстановления. При этом внедрение эфиромасличных культур в сельскохозяйственный оборот способствует не только рациональному использованию земель, подверженных деградации, но и повышению экономической эффективности отрасли [14, 15].

Производство высококачественной продукции открывает перспективы для расширения внутреннего рынка и увеличения экспортного потенциала региона, что способствует развитию сельского хозяйства и укреплению позиций России на мировом рынке эфиромасличной продукции. В целом, потребность России в продукции эфиромасличной отрасли (табл. 3), обоснована как внутренними экономическими потребностями, так и растущим спросом на экспорт.

Таблица 3 - Потребность России в продукции эфиромасличной отрасли
Table 3 — Russia's demand for products of the essential oil industry

Продукция	Потребность, т	Урожайность, т	Необходимая площадь, га
Базилик	5000	1,0-2,5	2000
Лаванда узколистная	10000	3,5-6,0	4700
Мелисса (лимонная трава)	800	20,0-25,0	400
Мята	20000	5,0-15,0	4000
Розмарин	10000	1,0-2,0	5000
Тимьян (чабрец)	15000	5,0-10,0	2000
Эстрагон	750	15,0-20,0	500

*расчеты автора по данным Росстата [16]

*author's calculations based on Rosstat data [16]

Важно отметить, что большинство из эфироносов обладают не только ценными эфирными маслами, но и выраженными лекарственными свойствами.

Однако, несмотря на перспективность

технологий возделывания эфироносов в условиях горной зоны РСО-Алания, развитие отрасли сталкивается с рядом серьезных вызовов и ограничений, требующих комплексного и системного подхода (табл. 4).

Таблица 4 – Вызовы и ограничения развития эфиромасличной отрасли в условиях горной зоны РСО-Алания

Table 4 – Challenges and constraints for the development of the essential oil industry in the mountainous zone of the Republic of North Ossetia–Alania

Вызовы и ограничения	Описание	Последствия
1	2	3
Ограниченность пригодных для механизированного земледелия земель	Большая часть территории – горные и предгорные районы, сложные рельефные условия	Ограниченные площади для возделывания, низкий уровень механизации
Сложные агротехнические условия	Специфические климатические и почвенные условия требуют адаптированных методов ведения сельского хозяйства	Снижение урожайности, рост затрат на производство, необходимость агроинновации
Высокие затраты на инфраструктуру и логистику	Развитие сельскохозяйственной инфраструктуры требует значительных инвестиций	Высокие расходы на транспортировку и хранение, низкая доступность рынков

Продолжение таблицы 4 / Table 4 (continued)

1	2	3
Нехватка специализированных перерабатывающих мощностей	Недостаточное количество перерабатывающих предприятий в регионе	Высокие издержки на транспортировку сырья, зависимость от других регионов
Дефицит квалифицированных кадров	Недостаток специалистов в области эфиромасличного производства, селекции, переработки и логистики	Замедление внедрения передовых технологий, снижение конкурентоспособности
Необходимость адаптации современных технологий к условиям горного земледелия	Применяемые агротехнологии не всегда подходят для сложных природных условий региона	Высокие издержки на внедрение инновационных решений, необходимость НИОКР
Ограниченный доступ к инвестиционным ресурсам	Недостаток финансирования для аграрного сектора, слабая инвестиционная привлекательность региона	Торможение роста отрасли, низкий уровень внедрения современных технологий
Отсутствие специализированного координирующего органа	Нет единой структуры для управления и поддержки отрасли на региональном уровне	Сложности с планированием, координацией, доступом к субсидиям и инвесторам

Расширение производства заметно ограничивается рядом объективных факторов. Прежде всего, в регионе недостаточно участков, которые по своим характеристикам подходят для механизированного земледелия. Ситуацию усугубляют сложные агротехнические условия, а также значительные расходы, связанные с созданием инфраструктуры и выстраиванием логистических цепочек. Отдельной проблемой выступает дефицит специализированных мощностей по переработке, без которых наращивание выпуска сырья не приводит к сопоставимому росту готовой продукции.

За последние несколько десятилетий в горных районах Северной Осетии произошло значительное сокращение населения. Сложные экономические условия, неразвитая инфраструктура, отсутствие производства и другие причины привели к массовому переселению людей на равнинную часть региона. Объемы неиспользуемых угодий стремительно увеличивались. В этой связи сохраняются кадровые ограничения: ощущается нехватка специалистов, способных сопровождать технологические процессы на современном уровне. Дополнительные трудности вызывает необходимость адаптировать новые решения к специфике горного земледелия.

Существенным сдерживающим обстоятельством остается и ограниченный доступ к инвестиционным ресурсам.

Отрицательное влияние оказывает и институциональный фактор. Отсутствие профильной структуры, которая на региональном уровне обеспечивала бы координацию и контроль этапов выращивания, заготовки и переработки эфиромасличных культур, осложняет согласованную работу аграрных организаций и фермерских хозяйств. В результате замедляется внедрение инновационных подходов, снижается реальная доступность мер государственной поддержки, а развитие отрасли в целом происходит менее динамично. Это, в конечном счете, ограничивает объем внутреннего производства и ослабляет конкурентные позиции региональной продукции как на российском, так и на внешних рынках.

Решение выявленных проблем возможно путем целенаправленного развития научно-технической базы, создания государственных программ поддержки отрасли и внедрения современных экологически безопасных технологий, что позволит эффективно использовать природный потенциал региона и укрепить позиции отечественного производства эфиромасличной продукции (табл. 5).

Таблица 5 – Перспективы развития эфиромасличной отрасли в условиях горной зоны РСО-Алания

Table 5 – Prospects for the development of the essential oil industry in the mountainous zone of the Republic of North Ossetia–Alania

Перспективные направления	Описание	Ожидаемый эффект
1	2	3
Развитие специализированной инфраструктуры	Строительство и модернизация перерабатывающих мощностей, улучшение транспортной и логистической сети	Уменьшение издержек, увеличение объемов производства, повышение качества продукции
Развитие сельского предпринимательства	Создание условий для роста и поддержки малых и средних предприятий, внедрение новых бизнес-моделей	Увеличение числа рабочих мест, стимулирование местной экономики

Продолжение таблицы 5 / Table 5 (continued)

1	2	3
Создание координирующего органа	Формирование специализированного центра для управления, поддержки и контроля за развитием отрасли	Эффективное планирование, доступ к субсидиям, развитие экспортного потенциала
Адаптация современных агротехнологий	Внедрение инновационных методов выращивания, полива и защиты растений, адаптированных к горным условиям	Повышение урожайности, снижение производственных затрат, устойчивое развитие
Поддержка научно-исследовательских работ	Разработка селекционных программ, изучение оптимальных агротехнологий для региона	Выведение адаптированных сортов, улучшение качества эфирных масел, повышение продуктивности
Развитие образовательных программ и кадрового потенциала	Создание обучающих центров, подготовка специалистов по выращиванию и переработке эфиромасличных культур	Увеличение числа квалифицированных кадров, внедрение передовых методов ведения хозяйства
Привлечение инвестиций и господдержка	Разработка программ субсидирования, налоговых льгот и грантов для аграрных предприятий	Увеличение финансирования отрасли, расширение посевных площадей, повышение конкурентоспособности
Расширение рынков сбыта и развитие экспорта	Создание благоприятных условий для выхода продукции на российский и международные рынки	Увеличение доходов производителей, повышение имиджа региона как центра эфиромасличного производства
Экологически безопасное производство	Внедрение органического земледелия, использование природных удобрений, отказ от химических пестицидов	Улучшение качества продукции, повышение привлекательности для экоспециализированных рынков

В течение последних лет наблюдается новый виток интереса к горным районам республики. В первую очередь он обусловлен активизацией туристско-рекреационного направления и сопутствующей инфраструктуры.

При этом значительная часть земельных ресурсов фактически остается вне хозяйственного оборота. Речь идет как о неиспользуемых угодьях, так и о малопригодных, либо труднодоступных участках, находящихся в частной собственности. Владельцы таких земель, как правило, не рассматривают небольшие по площади, разрозненные наделы как основу для устойчивой экономической деятельности.

В данной ситуации существенное значение приобретает опора на современные достижения агрономической науки и практики. Комплекс мер, ориентированных на повышение плодородия почв, рост урожайности и улучшение экономических показателей землепользования, способен сделать рентабельными даже мелкоконтурные участки, что особенно важно именно для горных территорий.

Дополнительные возможности открывает развитие органического земледелия с использованием местных природных агроруд и возобновляемых биологических ресурсов. Такой подход может расширить спектр занятости для населения, повысить эффективность сельскохозяйственного производства и создать предпосылки для закрепления и притока молодежи в горные районы.

Выводы. В целом, развитие эфиромасличной отрасли в горной зоне РСО-Алания на основе рационального землеустройства позволит оптимизировать использование сельскохозяйственных земель, повысить их продуктивность и предотвратить деградацию почв. Комплексный подход к зонированию, внедрение современных методов почвозащиты и эффективное использование малопродуктивных земель для возделывания эфиромасличной культуры, значительно укрепит аграрный потенциал региона, повысит его инвестиционную привлекательность и обеспечит долгосрочное устойчивое развитие отрасли.

Литература

1. Экзогенная регуляция биопродуктивности эфиромасличных культур в условиях Западного Предкавказья / О.А. Быкова, А.И. Морозов, Р.Р. Тхаганов, Н.С. Тропина // Агрохимический вестник. 2022. № 3. С. 69-73. doi: 10.24412/1029-2551-2022-3-013.
2. Rational use of land resources: regional aspect / B. Kozyrev, E. Tsoraeva, Al. A. Nagam [et al.] // E3S Web of Conferences : 22. Voronezh, 2021. P. 03018. doi: 10.1051/e3sconf/202124403018.
3. Паштецкий В.С., Невкрытая Н.В., Мишнев А.В. История, современное состояние и перспективы развития эфиромасличной отрасли // Аграрный вестник Урала. 2017. № 11(165). С. 37-46.
4. Namiota M., Bonikowski R. The current state of knowledge about essential oil fumigation for quality of crops during postharvest // International Journal of Molecular Sciences. 2021. Vol. 22. No. 24. doi: 10.3390/ijms222413351.
5. Water productivity of essential oil yield and quality of six selected essential oil crops as affected by varying

- temperature and irrigation regimes / J. Malaka, P. Soundy, H. Araya [et al.] // *Acta Horticulturae*. 2024. No. 1409. P. 467-474. doi: 10.17660/actahortic.2024.1409.59.
6. Годяева М.М., Уютова Н.И. Анализ аккумуляции и острых фитотоксических реакций базилика душистого *Ocimum basilicum* на контаминацию свинцом в начальные фазы развития растений // *Аграрный научный журнал*. 2023. № 12. С. 18-22. doi: 10.28983/asj.y2023i12pp18-22.
7. Вердыш М.В., Попова А.А. Показатели мирового и российского рынков эфирных масел в 2021-2023 гг. // *Инновационное развитие экономики: материалы третьего Крымского международного инновационного форума*. Симферополь, 2024. С. 108-113.
8. Пешчанская Е.В. К истории разведения лекарственных растений и их применения для улучшения окружающей среды // *Природообустройство*. 2023. № 5. С. 134-139. doi: 10.26897/1997601120235-134-139.
9. Essential Oil Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product, By Application, By Source, by Method of Extraction and By Region Forecasts, 2025-2033. URL: <https://straitresearch.com/report/essential-oil-market> (дата обращения: 13.01.2025).
10. Рынок эфиромасличных культур в России, анализ развития: исследование и прогноз до 2030 г. URL: <https://roif-expert.ru/selskoe-khozyajstvo/maslichnye-kultury/rynok-efirno-maslichnyh-kul-tur/rynok-efirno-maslichnyh-kul-tur-v-rossii-obzor-i-prognoz.html> (дата обращения: 15.01.2025).
11. Годовая статистика международной торговли товарами (HS), 2024. URL: <https://trendeconomy.ru/data/h2/Russia/33> (дата обращения: 17.01.2025).
12. Неиспользуемые сельскохозяйственные угодья. 05.11.2024. URL: <https://rshzm.ru/tpost/for0415vf1-neispolzuemie-selskokozyaistvennie-ugody> (дата обращения: 17.01.2025).
13. Земельный потенциал России: состояние, проблемы и меры по его рациональному использованию и охране. Аналитическая записка, 2023. URL: <https://www.ras.ru/FStorage/download.aspx?id=5e5ba20e-8e6f-440b-8e17-5b52118fe86c> (дата обращения: 17.01.2025).
14. Социально-экономические предпосылки устойчивого развития сельских территорий в Правобережном районе РСО-Алания / Л.М. Хугаева, Л.Ж. Басиева, А.А. Пех и др. // *Землеустройство, кадастр и мониторинг земель*. 2022. № 2. С. 110-115. doi: 10.33920/sel-04-2202-05.
15. Short crop rotation productivity with adaptive agricultural technologies / P.I. Migulev, V.S. Androshchuk, A.A. Akimov [et al.] // *Journal of Critical Reviews*. 2020. Vol. 7, No. 9. P. 1047-1051. doi: 10.31838/jcr.07.09.193.
16. Управление Федеральной службы государственной статистики по Северо-Кавказскому федеральному округу. URL: <https://26.rosstat.gov.ru/folder/29922?print=1> (дата обращения: 13.01.2025).

References

1. Bykova OA, Morozov AI, Tkhanov RR, Tropina NS. [Exogenous regulation of essential oil crop bioproductivity in Western Ciscaucasia]. *Agrokhimicheskii vestnik*. 2022; 3. 69-73 p. doi: 10.24412/1029-2551-2022-3-013.
2. Kozyrev B, Tsoraeva E, Nagam ALA. Rational use of land resources: regional aspect. *E3S Web of Conferences*. 2021; 03018 p. doi: 10.1051/e3sconf/202124403018.
3. Pashetitskiy VS, Nevkrytaya NV, Mishnev AV. [History, current state and development prospects of the essential oil industry]. *Agrarnyy vestnik Urala*. 2017; 11(165). 37-46 p.
4. Namiota M, Bonikowski R. The current state of knowledge about essential oil fumigation for quality of crops during postharvest. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021; Vol.22. No.24. doi: 10.3390/ijms222413351.
5. Malaka J, Soundy P, Araya H. Water productivity of essential oil yield and quality of six selected essential oil crops as affected by varying temperature and irrigation regimes. *Acta Horticulturae*. 2024; No.1409. 467-474 p. doi: 10.17660/actahortic.2024.1409.59.
6. Godyaeva MM, Uytova NI. [Analysis of accumulation and acute phytotoxic reactions of sweet basil *Ocimum basilicum* to lead contamination in the initial phases of plant development]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal*. 2023; 12. 18-22 p. doi: 10.28983/asj.y2023i12pp18-22.
7. Verdysh MV, Popova AA. [Indicators of global and Russian essential oil markets in 2021-2023. Innovative development of the economy]. *Materialy tretogo Krymskogo mezhdunarodnogo innovatsionnogo foruma*. Simferopol. 2024; 108-113 p.
8. Peshchanskaya EV. [On the history of medicinal plant cultivation and their use to improve the environment]. *Prirodobustroystvo*. 2023; 5. 134-139 p. doi: 10.26897/1997601120235-134-139.
9. Essential oil market size, share & trends analysis report by product, by application, by source, by method of extraction and by region forecasts, 2025-2033. [Internet]. *Straitresearch*. [cited 2025, January 13]. Available from: <https://straitresearch.com/report/essential-oil-market>.
10. The essential oil crops market in Russia, development analysis: research and forecast to 2030. [Internet]. *Marketing agency Roif-expert*. [cited 2025, January 15]. Available from: <https://roif-expert.ru/selskoe-khozyajstvo/maslichnye-kultury/rynok-efirno-maslichnyh-kul-tur/rynok-efirno-maslichnyh-kul-tur-v-rossii-obzor-i-prognoz.html>
11. Annual statistics of International Merchandise Trade (HS). [Internet]. *Trend Economy*. [cited 2025, January 17]. Available from: <https://trendeconomy.ru/data/h2/Russia/33>.
12. Unused agricultural land. [Internet]. *Russian Center for State Monitoring of Agricultural Lands*. [cited 2025, January 17]. Available from: <https://rshzm.ru/tpost/for0415vf1-neispolzuemie-selskokozyaistvennie-ugody>.
13. Land potential of Russia: status, problems and measures for its rational use and protection. Analytical note. [Internet]. *Russian Academy of Sciences*. 2023. [cited 2025, January 17]. Available from: <https://www.ras.ru/FStorage/download.aspx?id=5e5ba20e-8e6f-440b-8e17-5b52118fe86c>.
14. Khugaeva LM, Basieva LZ, Pekh AA. [Social and economic prerequisites for sustainable development of rural areas in the right bank district of the Republic of North Ossetia-Alania]. *Zemleustroystvo, kadastr i monitoring zemel*. 2022; 2. 110-115 p. doi: 10.33920/sel-04-2202-05.
15. Migulev PI, Androshchuk VS, Akimov AA. Short crop rotation productivity with adaptive agricultural technologies. *Journal of Critical Reviews*. 2020; Vol.7. No.9. 1047-1051 p. doi: 10.31838/jcr.07.09.193.

16. Office of Federal State Statistics Service for North Caucasus Federal District. [Internet]. Official website. [cited 2025, January 13]. Available from: <https://26.rosstat.gov.ru/folder/29922?print=1>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Козырев Асланбек Хасанович - доктор сельскохозяйственных наук, профессор, главный научный сотрудник отдела адаптивно-ландшафтного земледелия Северо-Кавказского научно-исследовательского института горного и предгорного сельского хозяйства – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук» (СКНИИГПСХ ВНИЦ РАН), РСО-Алания, (363110, Российская Федерация, Республика Северная Осетия - Алания, р-н Пригородный, с. Михайловское, ул. Вильямса, д. 1), email: ironlag@mail.ru, ORCID 0000-0003-2790-7895

Кайтов Ацамаз Асланбекович - аспирант отдела адаптивно-ландшафтного земледелия Северо-Кавказского научно-исследовательского института горного и предгорного сельского хозяйства – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального научного центра «Владикавказский научный центр Российской академии наук» (СКНИИГПСХ ВНИЦ РАН), РСО-Алания, (363110, Российская Федерация, Республика Северная Осетия - Алания, р-н Пригородный, с. Михайловское, ул. Вильямса, д. 1), email: Atsik762@gmail.com, ORCID 0009-0005-3961-5947

Вклад авторов:

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 23.05.2025; одобрена после рецензирования 16.03.2026; принята к публикации 01.04.2026.

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

Authors:

Kozyrev Aslanbek Khasanovich - Doctor of Agricultural Sciences, Professor, chief researcher of Adaptive Landscape Farming Department North Caucasus Research Institute of Mountain and Foothill Agriculture - Branch of Federal State Budgetary Scientific Institution of Science, Federal Scientific Center "Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences" (SKNIIGPSh VSC RAS), Republic of North Ossetia-Alania, 1 Williams Street, Mikhailovskoye Village, Prigorodny District, Republic of North Ossetia-Alania, 363110, Russian Federation), email: ironlag@mail.ru, ORCID 0000-0003-2790-7895

Kaytov Atsamaz Aslanbekovich – post-graduate student of Adaptive Landscape Farming Department North Caucasus Research Institute of Mountain and Foothill Agriculture - Branch of Federal State Budgetary Scientific Institution of Science, Federal Scientific Center "Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences" (SKNIIGPSh VSC RAS), Republic of North Ossetia-Alania, 1 Williams Street, Mikhailovskoye Village, Prigorodny District, Republic of North Ossetia-Alania, 363110, Russian Federation), email: Atsik762@gmail.com, ORCID 0009-0005-3961-5947

Contribution of the authors:

All authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 23.05.2025; revised 16.03.2026; accepted 01.04.2026.



**ОЦЕНКА ИНВЕСТИЦИЙ В ОСНОВНОЙ КАПИТАЛ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РЕГИОНА ПОСРЕДСТВОМ НАЛОГОВЫХ МЕХАНИЗМОВ**

© 2026 Мандрощенко О. В.¹, Хоружий В. И.¹, Клычова Г. С.² ✉

¹ *Финансовый университет при Правительстве РФ
(г. Москва, Российская Федерация)*

² *Казанский государственный аграрный университет
(г. Казань, Российская Федерация)*

✉ kgaukgs@mail.ru

Реферат. Существующую совокупность социальных, экономических и политических проблем можно решить только при условии долгосрочного экономического роста. Одной из важнейших тенденций развития экономики является рост инвестиций. Низкий уровень технического вооружения труда, изношенность основных средств является одной из основных проблем развития сельскохозяйственной отрасли. Поэтому перспективным вектором развития аграрного производства является его интенсификация за счет внедрения современных технологий и обновления материально-технической базы. Степень износа основных фондов в сельском хозяйстве по Краснодарскому краю в 2024 году составила 50,6% против 43,3% – по всем видам экономической деятельности. При этом свыше трети сельскохозяйственной техники морально устарело и требует замены. Такое положение ставит перед государством сложную задачу по разработке и применению стимулирующих инструментов для мобилизации инвестиционных ресурсов сельскохозяйственных предприятий. С помощью налоговой системы государство влияет на объем финансовых ресурсов, которые могут быть направлены организациями на развитие и расширение материально-технической базы, то есть использованы как инвестиции в форме капитальных вложений в основной капитал. Разнообразие налоговых льгот, преференций, специальных налоговых режимов оказывают незначительное влияние на повышение инвестиционной активности организаций, в том числе, относящихся к сельскохозяйственным. Замена уплаты нескольких видов налогов единым налогом при использовании специальных налоговых режимов фактически означает передачу государством бизнесу части финансовых ресурсов, не требуя инвестирования в развитие материально-технической базы. Дальнейшее эффективное развитие материально-технической базы в сельском хозяйстве региона предполагается путем активного разъяснения преимуществ использования амортизационной премии, инвестиционного налогового вычета, специальных налоговых режимов, которые способствуют формированию источников капитальных вложений.

Ключевые слова: инвестиции, сельское хозяйство региона, налоговые льготы, специальные налоговые режимы, малый бизнес.

Для цитирования: Мандрощенко О.В., Хоружий В.И., Клычова Г.С. Оценка инвестиций в основной капитал сельского хозяйства региона посредством налоговых механизмов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 155-162. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-155-162

**ASSESSMENT OF INVESTMENTS IN REGIONAL AGRICULTURE CAPITAL
THROUGH TAX MECHANISMS**

© 2026 Mandroshchenko O. V.¹, Khoruzhiy V. I.¹, Klychova G. S.² ✉

*Financial University under the Government of the Russian Federation
(Moscow, Russian Federation)*

*Kazan State Agrarian University
(Kazan, Russian Federation)*

✉ kgaukgs@mail.ru

Abstract. The existing set of social, economic and political problems can only be resolved through long-term economic growth. One of the most important trends in economic development is increasing investment. Low level of technical equipment and depreciation of fixed assets are among the main problems in the development of agricultural sector. Therefore, a promising vector for the development of agricultural production is its intensification through the introduction of modern technologies and modernization of material and technical base. The depreciation degree of fixed assets in agriculture in Krasnodar Krai in 2024 was 50.6%, compared to 43.3% for all types of economic activity. Moreover, over a third of agricultural machinery is obsolete and requires replacement. This situation poses a complex challenge for government in developing and implementing incentives to mobilize investment

resources for agricultural enterprises. Through the tax system, the state influences the amount of financial resources that organizations can direct toward developing and expanding their material and technical base, i.e., using them as capital investments in fixed assets. A variety of tax benefits, preferences and special tax regimes have little impact on increasing the investment activity of organizations, including those in the agricultural sector. Replacing the payment of several types of taxes with a single tax under special tax regimes effectively transfers some financial resources from the state to businesses without requiring investment in the development of material and technical bases. Further effective development of the material and technical base in regional agriculture is expected through active promotion of the benefits of using depreciation bonuses, investment tax deductions and special tax regimes that facilitate the formation of sources of capital investment.

Key words: investment, regional agriculture, tax benefits, special tax regimes, small business.

For citation: Mandroshchenko OV, Khoruzhiy VI, Klychova GS. [Assessment of investments in regional agriculture capital through tax mechanisms]. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2026; Vol. 21. 1(81). 155-162 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-155-162

Введение. Экономический рост, связанный с увеличением производства товаров, во многом зависит от проводимой бюджетно-налоговой политики [1], вводимых против страны санкций [2], а также структуры инвестиций – государственных и частных [3]. В традиционных моделях экономического развития инвестиции, создание капитальных фондов рассматриваются как базовое условие для долгосрочного роста и развития хозяйственной системы [4]. Инвестиции являются двигателем экономики, именно поэтому на современном этапе развития основным приоритетом экономики становится расширение инвестиций [5]. В контексте обеспечения продовольственной безопасности и доступа населения к качественным продуктам питания, критически важно укреплять материально-техническую базу агропромышленного комплекса и стимулировать инновационно-инвестиционное развитие его отраслей [6]. В последние годы политика федеральных органов власти направлена на смещение акцентов формирования инвестиционной политики в регионы, что является обоснованным, поскольку позволяет учитывать региональные особенности социально-экономического развития [7].

В 2024 году лидером по объему инвестиций в форме капитальных вложений стал Краснодарский край, на долю которого приходится 40% от всех инвестиций по Южному федеральному округу (ЮФО), что составляет 1,1 трлн. руб. По доле инвестиций в валовой региональный продукт (ВРП) регион также достиг рекордных значений: по итогам 2024 года этот показатель оценивается в 20%, что является наилучшим результатом за 6 лет, также превышающим средний по стране. Однако доля инвестиций сельского хозяйства в основном капитале региона составила всего 4,4%, против 21,5% в обрабатывающем производстве и 34,3% в транспортировке и хранении.

Важным условием независимости государства от мировых и финансовых кризисов является самообеспеченность страны продовольственными товарами, что объясняет необходимость развития сельского хозяйства.

Учитывая, что одним из ведущих аграрных регионов России является Краснодарский край, где развитие сельского хозяйства является ключевым направлением, проблема активизации процесса привлечения в экономику региона и, в частности в сельское хозяйство, реальных инвестиций в настоящее время является особенно актуальной, так как обусловлена экономической ситуацией, в которой находится наша страна.

Цель исследований заключается в оценке инвестиционной деятельности предприятий агропромышленного комплекса Краснодарского края на основе налоговой составляющей.

Условия, материалы и методы. В состав информационной базы исследования входят законодательные и нормативно-правовые документы и материалы (федеральные законы РФ, региональное законодательство), научные публикации (статьи, монографии, материалы научных журналов), данные Федеральной службы государственной статистики, ФНС России, Управления Федеральной службы государственной статистики по Краснодарскому краю. В процессе исследования применялся системный и комплексный подход, метод сравнения и аналогий, статистические и логические (причинно-следственные связи) методы. Основным периодом исследования является временной период с 2020 по 2024 годы.

По результатам исследования предполагается разработка предложений, которые позволят повысить уровень инвестиционной активности в основной капитал, оценить влияние отдельных видов налогов на собственные источники финансирования капитальных вложений.

Результаты и обсуждение. По данным Росстата в 2024 году капитальные инвестиции выросли на 7,4% по сравнению с 2023 годом, что в номинальном выражении составило 39,5 трлн. руб. [8]. Структура инвестиций в основной капитал по видам экономической деятельности наглядно отражает невысокий уровень капитальных вложений в сельское хозяйство по сравнению с другими отраслями, которые обладают высокой рентабельностью и коротким сроком окупаемости (табл. 1).

Таблица 1 – Структура инвестиций в основной капитал по видам экономической деятельности в РФ, в %

Table 1 – Structure of investments in fixed assets by type of economic activity in the Russian Federation, in %

Показатели	Годы				
	2020	2021	2022	2023	2024
Инвестиции в основной капитал, всего	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
В том числе: сельское, лесное и рыбное хозяйство	4,2	4,1	3,9	3,7	3,3
горнодобывающая промышленность, разработка карьеров	16,2	14,8	15,0	14,9	14,7
обрабатывающая промышленность	14,6	14,8	13,4	14,4	16,0
операции с недвижимым имуществом	14,1	13,2	13,3	12,5	12,4
транспорт и складирование	15,4	16,5	18,1	18,1	17,3

Источник: составлено авторами с использованием данных Росстата

Source: compiled by the authors using Rosstat data

Исследование динамики капиталовложений в основные фонды субъектов ЮФО выявило, что в период с 2020 по 2024 годы Краснодарский край демонстрирует стабильный прирост инвестиций (табл. 2).

При этом следует отметить, что доля вложений в материальные активы аграрного сектора края в общем объеме инвестиций по региону остается незначительной.

Таблица 2 – Инвестиции в основной капитал регионов ЮФО, млрд. руб.

Table 2 – Investments in fixed assets in the regions of the Southern Federal District, billion rubles

№ п/п	Регионы	Годы				
		2020	2021	2022	2023	2024
1.	Краснодарский край	518,2	558,6	753,1	869,8	1119,6
2.	Ростовская область	328,1	393,8	470,6	645,8	717,3
3.	Волгоградская область	182,9	186,1	219,9	291,4	364,6
4.	Республика Крым	196,5	164,1	214,6	293,0	289,3
5.	Астраханская область	115,1	115,5	87,4	89,4	115,8
6.	г. Севастополь	27,8	40,6	104,7	104,2	100,9
7.	Республика Адыгея	40,4	35,9	46,7	59,4	68,9
8.	Республика Калмыкия	38,3	17,8	15,8	13,3	23,2

Источник: составлено авторами с использованием данных Росстата

Source: compiled by the authors using Rosstat data

В 2022 году Краснодарский край успешно реализовал 54 инвестиционных проекта в сфере агропромышленного комплекса (АПК) на общую сумму 19,5 млрд рублей. В 2023 году объем инвестиций в сельское хозяйство региона превысил 56 млрд рублей, что свидетельствует о значительном росте и высокой заинтересованности инвесторов в развитии аграрного сектора.

Растениеводство в регионе является основой продовольственной безопасности как на местном, так и на федеральном уровне. Несмотря на прошлые кризисы и пандемию, отрасль демонстрирует стабильный рост и устойчивое производство большинства культур. Это обусловлено высоким потреблением овощей в ЮФО, что является частью местной культуры питания [9], а также активным участием в программах федерального

финансирования. В среднем, отрасль показывает умеренный рост на протяжении всего времени, независимо от внешних геополитических факторов [10].

Воспроизводство материально-технической базы в растениеводстве, особенно в части сельскохозяйственной техники, имеет ключевое значение. Приобретение современной, высокопроизводительной техники приводит к незначительному повышению обеспеченности организаций сельскохозяйственной техникой в количественном выражении. Так, за временной период с 2020 года по 2023 год темп роста количества тракторов увеличилось всего на 0,6%, плугов – на 0,5%, косилок – на 7%, а количество зерноуборочных комбайнов, культиваторов, машин для посева незначительно, но уменьшилось (табл. 3).

Таблица 3 – Наличие основных видов техники в сельскохозяйственных организациях Краснодарского края (штук)

Table 3 – Availability of main types of machinery in agricultural organizations of the Krasnodar Krai (units)

Виды сельскохозяйственной техники	Годы				Темп роста 2023/2020, в %
	2020	2021	2022	2023	
Тракторы	17542	17189	17016	17640	100,6
Плуги	4721	4592	4536	4744	100,5
Дождевальные и поливные машины и установки	653	691	759	825	126,3
Зерноуборочные комбайны	3341	3220	3147	3292	0,99
Культиваторы	8279	8062	7938	8184	0,99
Машины для посева	5080	4859	4753	4819	0,95
Косилки	1911	1964	1967	2044	107,0

Источник: составлено авторами с использованием данных Краснодарстата
Source: compiled by the authors using Krasnodarstat data

Важнейшим стратегическим фактором подъема и решения многих социальных проблем является формирование современного предпринимательства в экономическом пространстве России, что требует активизации инвестиционной деятельности, прежде всего на уровне хозяйствующих субъектов – предприятий и индивидуальных предпринимателей. Увеличение объема инвестиций на 60% по сравнению с уровнем 2020 года придется решать в новых, более сложных условиях, в

том числе с учетом сжатия кредитования из-за жесткой денежно-кредитной политики, а также роста обслуживания долга, снижения рентабельности не только в частном, но и в государственном секторе [11].

Рассматривая источники финансирования инвестиционной деятельности хозяйствующих субъектов, наблюдается тенденция роста удельного веса использования собственных инвестиционных средств и снижение доли привлеченных средств (табл.4).

Таблица 4 – Структура инвестиций в основной капитал по источникам финансирования в Краснодарском крае, в %

Table 4 – Structure of investments in fixed assets by sources of financing in the Krasnodar Krai, in %

Показатели	Годы			
	2020	2021	2022	2023
Инвестиции в основной капитал - всего	100,0	100,0	100,0	100,0
в том числе по источникам финансирования: собственные средства	45,2	50,5	50,3	55,1
привлеченные средства	54,8	49,5	49,7	44,9
из них бюджетные средства	20,9	21,4	21,1	21,9

Источник: составлено авторами с использованием данных Краснодарстата
Source: compiled by the authors using Krasnodarstat data

В структуре привлеченных средств более 50% составляют кредиты банков. Удельный вес финансирования капитальных вложений в 2023 году за счет федерального бюджета составил 11%, регионального – 8,2%, местных – 2,7%. Исходя из данного соотношения следует полагать, что предприниматели используют в своей инвестиционной деятельности в основном собственные источники финансирования капитальных вложений в виде чистой прибыли, остающейся в распоряжении субъектов хозяйственной деятельности.

Основным показателем-фактором, влияющим на увеличение суммы чистой прибыли, является налоговая составляющая. Развитие налоговой конкуренции между субъектами за привлечение инвестиций на свои территории связано с предоставлением налоговых льгот и преференций. При этом, используя налоговые стимулы для развития инвестиционной деятельности, налогоплательщики часть

денежных средств, сэкономленных в виде налогов в бюджеты различных уровней, могут направить на расширение, модернизацию, реконструкцию, строительство производственных мощностей.

Одним из основных источников финансирования капитальных вложений являются амортизационные отчисления. Налоговый кодекс РФ предоставляет налогоплательщикам гибкие механизмы амортизации, призванные стимулировать обновление их основных средств. Эти механизмы включают в себя выбор между различными методами начисления амортизации (линейным и нелинейным), возможность применения амортизационной премии и использование повышающих коэффициентов.

Для целей налогообложения прибыли налогоплательщики могут начислять амортизационную премию, что позволяет хозяйствующим субъектам существенно

экономить денежные средства при исчислении налога на прибыль организаций, тем самым увеличивая чистую прибыль, как источника финансирования капитальных вложений. Налогоплательщики могут использовать средства в размере амортизационной премии на инвестирование в собственное производство, например, на обновление уже имеющейся материально-технической базы или на освоение новых видов деятельности.

Согласно данным анализа расходов налогоплательщиков, в Краснодарском крае в 2024 году отмечен рост применения амортизационной премии по сравнению с показателями 2020 года. Однако в абсолютном выражении наблюдается незначительное количество налогоплательщиков, применяющих амортизационную премию, что свидетельствует о непопулярности ее использования в Краснодарском крае (табл. 5).

Таблица 5 – Показатели применения налогоплательщиками амортизационной премии в Краснодарском крае

Table 5 – Indicators of taxpayers' use of the depreciation bonus in the Krasnodar Krai

Наименование показателей	Годы				
	2020	2021	2022	2023	2024
Количество налогоплательщиков, применяющих амортизационную премию, ед.	281	294	312	357	390
Сумма амортизационной премии в размере не более 10%, млн. руб.	1 395,2	1 548,7	3 064,7	5 457,5	4 542,4
Сумма амортизационной премии в размере не более 30%, млн. руб.	10 088,0	14 519,0	16 082,0	23 134,6	32 959,5

Источник: составлено авторами с использованием данных ФНС России

Source: compiled by the authors using data from the Federal Tax Service of Russia

Если рассматривать экономию налогоплательщиков по налогу на прибыль организаций за счет начисления амортизационной премии, то она возросла в 3,3 раза в 2024 году по сравнению с 2020 годом. Однако по сравнению с 2023 годом налоговая база за счет уменьшения суммы амортизационных отчислений на 16,8% увеличилась на 20% – при начислении амортизационной премии в размере не более 10%, и, наоборот, при начислении амортизационной премии в размере не более 30%, налоговая база уменьшилась на 42,5%. Результаты анализа показывают стремление налогоплательщиков к обновлению материально-технической базы путем приобретения основных средств с длительным сроком использования – до 20 лет включительно.

Также важно отметить, что существует прямая корреляция между долей амортизационных отчислений в структуре инвестиционных источников и уровнем экономического развития региона. В среднем амортизационная премия в общем объеме инвестиций в основной капитал в Краснодарском крае, как и в целом по стране, составляет лишь около 20%, что значительно ниже показателей зарубежных экономик, таких как США (приблизительно 60%) и европейских стран, включая Германию и Францию, где данный показатель превышает 70%. Главный недостаток этого налогового стимула для инвестиций заключается в том, что российские компании, в том числе сельскохозяйственные, часто направляют сэкономленные на налогах средства не на модернизацию основных фондов, а на увеличение оборотных средств, что приводит к значительному отставанию в уровне инвестиций, финансируемых за счет амортизации. Поэтому причиной неэффективного

использования амортизационных отчислений является отсутствие прямой зависимости размера начислений амортизации, уменьшающей налоговую базу по налогу на прибыль, и фактического ее использования на обновление основного капитала [12].

Кроме того, сельскохозяйственные товаропроизводители имеют право применять ставку налога на прибыль в размере 0% при условии, если производство и реализация собственной продукции составляет не менее 70% в выручке. В результате анализа статистической отчетности, связанной со снижением налоговой базы по налогу на прибыль организаций в связи с применением нулевой ставки установлено, что количество налогоплательщиков – сельскохозяйственных товаропроизводителей за 2020-2024 годы в среднем увеличилось на 2,5%, а сумма недопоступления налога уменьшилась в среднем на 11%, что косвенно указывает на снижение эффективности аграрного производства.

Исследование регионального законодательства, предусматривающего предоставление налоговых льгот, показывает наиболее распространенный вид льготы по налогу на прибыль организаций – инвестиционный налоговый вычет (ИНВ). В среднем по каждому федеральному округу 50-60% регионов, входящих в их состав, предоставляют данную льготу налогоплательщикам.

Механизм использования ИНВ позволяет организациям уменьшать исчисленный к уплате налог в региональный бюджет на стоимость приобретенных основных средств, затраты на их модернизацию и некоторые другие расходы – при определенных условиях. Например, закон Краснодарского края от 28.11.2019 № 4170-КЗ «Об инвестиционном налоговом

вычете по налогу на прибыль организаций» предоставляет право на применение ИНВ организациям, занимающимся в области сельского хозяйства, при условии, что доходы по данному виду деятельности составляют не менее 70% от общей суммы доходов организации. Кроме того, установлен предельный размер ИНВ на 2021-2027 годы: не более 70% от суммы расходов, составляющей первоначальную стоимость основных средств; не более 70% от суммы расходов, составляющей величину изменения первоначальной стоимости основных средств. Действующий с 2018 года инструмент инвестиционного налогового вычета (ИНВ) оказался мало востребован в регионе компаниями, так как действующая версия ИНВ не оказывает существенного влияния на рост инвестиций. Более того, в 2023 году объем предоставленных дотаций компенсировал лишь 5% расходов региона на инвестиционные налоговые вычеты.

Малый бизнес является локомотивом экономического роста, так как именно на него возлагается ведущая роль в развитии отрасли сельского хозяйства [13]. Наиболее востребованными в сельском хозяйстве режимами налогообложения является упрощенная система налогообложения (УСН) и система налогообложения в виде единого сельскохозяйственного налога (ЕСХН).

УСН имеет ряд преимуществ по сравнению с общей системой налогообложения в части вариативности объектов налогообложения. При УСН в качестве объектов налогообложения могут выступать доходы, облагаемые по ставке 6%, а также доходы, уменьшенные на величину расходов, облагаемые по ставке 15%. С 2026 года произошли существенные изменения, связанные с применением налогоплательщиками данного режима. Во-первых, изменились условия применения УСН: доходы за налоговый период (календарный год) не должны превышать 490,5 млн руб., количество сотрудников должно быть не более 130 человек, остаточная стоимость основных средств не должна превышать более 218 млн руб. Во-вторых, организации и индивидуальные предприниматели являются плательщиками НДС, если их годовой доход превысил 20 млн руб. Данные изменения являются ценными для налогоплательщиков, так как расширен диапазон экономических показателей, что является стимулом к дальнейшему развитию бизнеса в комфортных условиях, с одной стороны. С другой стороны, возможность уплачивать НДС способствует расширению экономических связей с компаниями, которые используют общую систему налогообложения.

С 1 января 2025 года на территории Краснодарского края введен специальный налоговый режим «Автоматизированная упрощенная система налогообложения» (АУСН), которая подходит небольшим организациям и предпринимателям с численностью работников

не более 5 человек и годовым доходом до 60 млн. руб. Налогоплательщики могут выбрать один из двух объектов налогообложения: доходы со ставкой 8%, либо доходы за минусом расходов – со ставкой 20%. Налог рассчитывается автоматически на основе информации из онлайн-кассы и банка. АУСН очень удобна микро- и малым предприятиям, так как экономия затрат, связанных с исчислением единого налога, способствует высвобождению финансовых ресурсов для развития предпринимательской деятельности.

Использование системы налогообложения в виде ЕСХН сельскохозяйственными товаропроизводителями имеет как преимущества, так и недостатки. К преимуществам относятся: низкая налоговая нагрузка, связанная с тем, что общая налоговая ставка составляет 6%, которая может быть снижена регионом до 0%; налоговая база определяется путем вычитания из суммы доходов расходов, причем в расходах учитываются практически все специфические затраты, присущие отрасли. Более того, использование ЕСХН налогоплательщиками способствует дезинтермедиации, что сдерживает рост розничных цен. Среди преимуществ можно выделить признание плательщиков ЕСХН плательщиками НДС с 1 января 2019 года, что способствует тесной кооперации с организациями, применяющими общую систему налогообложения. В то же время к недостаткам применения ЕСХН налогоплательщики относят сложные условия перехода на данный специальный режим, требованием которого является соблюдение предельного ограничения дохода от реализации сельскохозяйственной продукции в размере не менее 70%. Это достаточно высокий удельный вес, поэтому многие организации не могут превысить данный «пороговый» уровень.

Таким образом, малому предпринимательству предоставляются значительные налоговые преференции, которые способствуют сокращению налоговой нагрузки вследствие замены уплаты ряда налогов единым налогом. Однако все специальные налоговые режимы в определенной степени создают налогоплательщику барьеры в их применении, что является сдерживающим фактором их использования.

Выводы. Одной из сложных задач развития сельского хозяйства в регионе является создание условий, стимулирующих российских налогоплательщиков вкладывать финансовые средства в обновление основных фондов. Недостаточный приток инвестиций в основной капитал в аграрном секторе препятствует модернизации материально-технической базы. Несмотря на то, что разработанные налоговые механизмы призваны стимулировать инвестиционную активность, результаты исследования свидетельствуют о недостаточном их использовании со стороны налогоплательщиков. В связи с этим

необходимо провести инвентаризацию налоговых льгот и преференций, сократить количество и сделать их максимально понятными и приемлемыми для налогоплательщиков. Кроме того, государство, предоставляя налоговые

льготы, фактически авансирует налогоплательщиков на реализацию инвестиционных проектов, поэтому целесообразно ввести отчетность по использованию таких льгот для целей расширенного воспроизводства.

Литература

1. Afonso A., Jalles J. T. How does fiscal policy affect investment? Evidence from a large panel. *International Journal of Finance & Economics*. 2015. Vol.20(4). pp.310-327. doi: 10.1002/ijfe.1518.
2. Nguyen T. T., Do M. H. Impact of economic sanctions and counter-sanctions on the Russian Federation's trade. *Economic Analysis and Policy*. 2021. Vol.71. pp.267-278. doi: 10.1016/j.eap.2021.05.004.
3. Afonso A., Aubyn M. S. Economic growth, public, and private investment returns in 17 OECD economies. *Portuguese Economic Journal*. 2019. Vol.18(1). pp.47-65. doi: 10.1007/s10258-018-0143-7.
4. Crafts N. The First Industrial Revolution: Resolving the slow growth/Rapid industrialization paradox. *Journal of the European Economic Association*. 2005. Vol.3(2-3). pp.525-534. doi: 10.1162/jeea.2005.3.2-3.525.
5. Мандрощенко О.В., Зверева Т.В., Татаренко А.М. О балансе интересов государства и налогоплательщиков в условиях новых приоритетов в экономике // *Российский экономический журнал*. 2024. №1. С.43-62. doi: 10.52210/0130-9757_2024_1_43.
6. Развитие материально-технической базы агропромышленного комплекса в условиях внешнеэкономических санкций / Д.Ф. Хафизов, А.Р. Валиев, Ф.Н. Мухаметгалиев [и др.] // *Вестник Казанского ГАУ*. 2023. № 4(72). С.170-177. doi: 10.12737/2073-0462-2023-170-177.
7. Налоговые инструменты в реализации инвестиционной политики регионов: монография. М.: ИТК «Дашков и К», 2021. 231с.
8. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс] – URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения 05.09.2025).
9. Ушачев И.Г., Маслова В.В., Колесников А.В. Нарастивание объемов агропромышленного производства для обеспечения продовольственной безопасности и увеличения экспортного потенциала АПК России // *Экономика региона*. 2022. №18(4). С. 1178-1193. doi: 10.17059/ekon.reg.2022-4-15.
10. Егорова А.И., Леоненко Н.С. Влияние динамики и структуры государственных расходов на экономический рост Российской Федерации в отраслевом разрезе // *Финансы: теория и практика*. 2025. №29(6). С. 6-17. doi: 10.26794/2587-5671-2025-29-6-6-17.
11. Гончаренко Л.И. Диверсификация налоговой системы как фактор реализации национальных проектов развития России // *Экономика. Налоги. Право*. 2025. №18(3). С. 144-154. doi: 10.26794/1999-849X-2024-18-3-144-154.
12. Пансков В.Г. Современные проблемы теории и практики налогообложения: монография. М.: Центр-каталог, 2023. 264 с.
13. Михайлова Л. В., Валиев А. Р. Анализ деятельности субъектов малого аграрного бизнеса в Республике Татарстан // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2025. Т. 18. № 2(85). С. 169-177. – doi: 10.53914/issn2071-2243_2025_2_169.

References

1. Afonso A, Jalles J T. How does fiscal policy affect investment? Evidence from a large panel. *International Journal of Finance & Economics*. 2015; 20(4). 310-327 p. doi: 10.1002/ijfe.1518.
2. Nguyen TT, Do MH. Impact of economic sanctions and counter-sanctions on the Russian Federation's trade. *Economic Analysis and Policy*. 2021; 71. 267-278 p. doi: 10.1016/j.eap.2021.05.004.
3. Afonso A, Aubyn MS. Economic growth, public, and private investment returns in 17 OECD economies. *Portuguese Economic Journal*. 2019; 18(1). 47-65 p. doi: 10.1007/s10258-018-0143-7.
4. Crafts N. The First Industrial Revolution: Resolving the slow growth/Rapid industrialization paradox. *Journal of the European Economic Association*. 2005; 3(2-3). 525-534 p. doi: 10.1162/jeea.2005.3.2-3.525.
5. Mandroshchenko OV, Zvereva TV, Tatarenko AM. [On the balance of interests of the state and taxpayers in the context of new priorities in the economy]. *Rossiyskiy ekonomicheskiy zhurnal*. 2024; 1. 43-62 p. doi: 10.52210/0130-9757_2024_1_43.
6. Khafizov DF, Valiev AR, Mukhametgaliev FN. [Development of material and technical base of agro-industrial complex in the context of foreign economic sanctions]. *Vestnik Kazanskogo GAU*. 2023; 4(72). 170-177 p. doi: 10.12737/2073-0462-2023-170-177.
7. Nalogovye instrumenty v realizatsii investitsionnoy politiki regionov: monografiya. [Tax instruments in the implementation of regional investment policy: monograph]. Moscow: ITK Dashkov i K. 2021; 231 p. - ISBN: 978-5-394-04799-2.
8. [Internet]. Federal State Statistics Service. [cited 2025, May 9]. Available from: <https://rosstat.gov.ru/>.
9. Ushachev IG, Maslova VV, Kolesnikov AV. [Increasing the volume of agricultural production to ensure food security and increase the export potential of the Russian agro-industrial complex]. *Ekonomika regiona*. 2022; 18(4). 1178-1193 p. doi: 10.17059/ekon.reg.2022-4-15.
10. Egorova AI, Leonenko NS. [The impact of the dynamics and structure of public expenditures on the economic growth of the Russian Federation by sector]. *Finansy: teoriya i praktika*. 2025; 29(6). 6-17 p. doi: 10.26794/2587-5671-2025-29-6-6-17.
11. Goncharenko LI. [Diversification of the tax system as a factor in the implementation of national development projects in Russia]. *Ekonomika. Nalogi. Pravo*. 2025; 18(3). 144-154 p. doi: 10.26794/1999-849Kh-2024-18-3-144-154.
12. Panskov VG. Sovremennye problemy teorii i praktiki nalogooblozheniya: monografiya. [Modern problems of taxation theory and practice: monograph]. Moscow: Tsentrkatalog. 2023; 264 p. - ISBN: 978-5-903268-77-1.
13. Mikhaylova LV, Valiev AR. [Analysis of the activities of small agricultural businesses in the Republic of Tatarstan]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2025; Vol. 18. 2(85). 169-177 p. doi: 10.53914/issn2071-2243_2025_2_169.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Мандрощенко Ольга Валентиновна – доктор экономических наук, профессор, профессор кафедры налогов и налогового администрирования Финансового университета при Правительстве РФ (125167, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский проспект, 49/2), e-mail: OVMandroshchenko@fa.ru, ORCID 0000-0002-1385-5417

Хоружий Валерий Иванович – доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры налогов и налогового администрирования Финансового университета при Правительстве РФ (125167, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский проспект, 49/2), e-mail: VIKhoruzhij@fa.ru, ORCID 0000-0001-6268-6640

Клычова Гузалия Салиховна – доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой бухгалтерского учета и аудита Казанского государственного аграрного университета (420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 65), e-mail: kgauks@mail.ru, ORCID 0000-0003-1524-0552

Вклад авторов:

О.В. Мандрощенко – разработка концепции, методология, написание оригинального текста;

В.И. Хоружий – обработка данных, исследование, визуализация;

Г.С. Клычова – научное руководство, проверка достоверности, редактирование.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 08.09.2025; одобрена после рецензирования 13.03.2026; принята к публикации 01.04.2026.

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

Authors:

Mandroshchenko Olga Valentinovna – Doctor of Economics, Professor, Professor of Taxes and Tax Administration Department Financial University under the Government of the Russian Federation, (49/2 Leningradskiy Prospekt, Moscow, 125167, Russian Federation), e-mail: OVMandroshchenko@fa.ru, ORCID 0000-0002-1385-5417

Khoruzhiy Valeriy Ivanovich – Doctor of Economics, Associate Professor, Professor of Taxes and Tax Administration Department Financial University under the Government of the Russian Federation, (49/2 Leningradskiy Prospekt, Moscow, 125167, Russian Federation), e-mail: VIKhoruzhij@fa.ru, ORCID 0000-0001-6268-6640

Klychova Guzaliya Salikhovna – Doctor of Economics, Professor, Head of Accounting and Auditing Department Kazan State Agrarian University (65 Karl Marx Street, Kazan, 420015, Russian Federation), e-mail: kgauks@mail.ru, ORCID 0000-0003-1524-0552

Contribution of the authors:

O.V. Mandroshchenko — Conceptualization, Methodology, Original draft writing;

V.I. Khoruzhy — Data processing, Investigation, Visualization;

G.S. Klychova — Scientific supervision, Validation, Editing.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 08.09.2025; revised 13.03.2026; accepted 01.04.2026.



УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА В УСЛОВИЯХ
КАДРОВОГО ДЕФИЦИТА

© 2026 Мясников Д.А. ✉, Ягудина Е.В.

Казанский (Приволжский) федеральный университет
(г. Казань, Российская Федерация)
✉ dmitriymyasnikov@mail.ru

Реферат. В условиях дефицита кадров на российском рынке труда агропромышленный комплекс столкнулся с острой проблемой необходимости изменения традиционных подходов повышения эффективности производства. В качестве ключевого подхода рассматривается взаимосвязь кадрового обеспечения агропромышленного комплекса с целями устойчивого развития и интеграции ESG-подхода в стратегию предприятий. На основе анализа динамики занятости и производительности в сельском хозяйстве России за 2017-2023 годы выявлено, что дефицит трудовых ресурсов и рост затрат на персонал делают экстенсивные модели развития экономически неэффективными. Коэффициент корреляции между валовым региональным продуктом и долей занятых в сельском хозяйстве от среднегодовой численности занятого населения в регионе составил 0,83, при этом влияние заработной платы на валовой региональный продукт оказалось значительно выше, чем доля занятых в сельском хозяйстве от среднегодовой численности занятого населения в регионе – 1,39 против 0,035. Выявлено, что драйвером к повышению заработной платы являются: внедрение современных технологий и автоматизация, повышение квалификации кадров, развитие эффективных цепочек создания стоимости и кооперации и переходу к производству продукции с высокой добавленной стоимостью. На основе чего обосновано, что переход к интенсивным моделям производства на основе цифровизации, автоматизации и модернизации техники является необходимым условием повышения эффективности и устойчивости отрасли. Интеграция ESG-принципов усиливает результативность интенсивных стратегий: экологический аспект способствует снижению ресурсопотребления и выбросов, социальный обеспечивает развитие кадрового потенциала и инфраструктуры сельских территорий, управленческий повышает прозрачность и ответственность бизнеса. Показано, что ESG подход становится внутренним фактором конкурентоспособности предприятий, а не внешним требованием. Практическая значимость исследования заключается в разработке рекомендаций по внедрению цифровых платформ управления, развитию корпоративных программ обучения и формированию привлекательной социальной среды в сельских территориях. Опираясь на полученные выводы определено, что интеграция ESG в интенсивное развитие обеспечивает устойчивость, инновационность и социальную ориентированность агропромышленного комплекса России.

Ключевые слова: устойчивое развитие, ESG, экстенсивный подход, интенсивный подход, агропромышленный сектор экономики, трудовой потенциал, производительность труда.

Для цитирования: Мясников Д.А., Ягудина Е.В. Устойчивое развитие агропромышленного комплекса в условиях кадрового дефицита // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 163-172. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-163-172

SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX IN
CONDITIONS OF PERSONNEL SHORTAGE

© 2026 Miasnikov D.A. ✉, Yagudina E.V.

Kazan (Volga Region) Federal University
(Kazan, Russian Federation)
✉ dmitriymyasnikov@mail.ru

Abstract. In the context of personnel shortage of in the Russian labor market, the agro-industrial complex faces the pressing need to change traditional approaches to improving production efficiency. The key approach is considered to be the relationship between staffing in the agro-industrial complex and sustainable development goals, as well as the integration of ESG approach into enterprise strategies. An analysis of employment and productivity trends in Russian agriculture from 2017 to 2023 reveals that labor shortages and rising personnel costs make extensive development models economically ineffective. The correlation coefficient between the gross regional product and number of people employed in agriculture as a percentage of the average annual employed population in the region was 0.83. The impact of wages on the gross regional product was significantly higher than the share of people employed in agriculture as a percentage of the average annual employed population in the region – 1.39 versus 0.035. It has been revealed that the drivers of wage increases include the introduction of modern technologies and automation, improved personnel skills, the development of efficient value chains and

cooperation, and the transition to high-value-added production. This study substantiates that the transition to intensive production models based on digitalization, automation and technological modernization is a prerequisite for improving the efficiency and sustainability of the industry. The integration of ESG principles enhances the effectiveness of intensive strategies: the environmental aspect contributes to a reduction in resource consumption and emissions, the social aspect ensures the development of human resources and rural infrastructure and the management aspect increases business transparency and accountability. It is demonstrated that ESG approach is becoming an internal factor in the competitiveness of enterprises, rather than an external requirement. The practical significance of the study lies in the development of recommendations for the implementation of digital management platforms, the development of corporate training programs, and the creation of an attractive social environment in rural areas. Based on the findings, it was determined that integrating ESG into intensive development ensures the sustainability, innovation, and social orientation of Russia's agro-industrial complex.

Key words: sustainable development, ESG, extensive approach, intensive approach, agro-industrial sector of the economy, labor potential, labor productivity.

For citation: Miasnikov DA, Yagudina EV. [Sustainable development of agro-industrial complex in conditions of personnel shortage]. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2026; Vol. 21. 1(81). 163-172 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-163-172

Введение. Санкционные ограничения явились значительным вызовом для устойчивого развития сельского хозяйства. Еще при введении первых ограничений в 2014 году значительная часть продовольственного импорта преимущественно из западных стран оказала существенный стимул для устойчивого развития сельского хозяйства. С одной стороны было видно как поднимается общественное волнение в самих западных странах, с другой стороны подстегивался интерес к импортозамещению или хотя бы к поиску альтернативных поставщиков в России. Особенно ярко это было выражено в поставках мясной, молочной продукции, а также в фруктах. Что в свою очередь породило ряд проблем. В случае импортозамещения основными препятствиями стали необходимость модернизации сельскохозяйственного производства и недостаток квалифицированных кадров, попутно сталкиваясь с недостаточным финансированием и человеческим фактором. А в случае с поиском альтернативных поставщиков возникает вопрос с обеспечением продовольственной безопасности.

На сегодняшний день в условиях реализации специальной военной операции, национальных проектов и стратегического курса на импортозамещение устойчивое развитие сельских территорий становится не просто приоритетом, а вопросом национальной безопасности [1]. Современное развитие агропромышленного комплекса характеризуется противоречивым сочетанием роста объемов производства [2] и дефицитом кадров как в самом АПК, так и в смежных отраслях, что представляет собой критический вызов для всех регионов России. Несмотря на значительные успехи в области модернизации производства и внедрения цифровых технологий, сохраняются и усугубляются системные риски, связанные с депопуляцией, старением сельского населения и «утечкой мозгов».

Несмотря на разницу в статистической информации, схожее мнение о дефиците кадров выражают представители Правительства Российской Федерации. Так, по данным парламентских слушаний, совокупный кадровый

дефицит в отрасли превышает 200 тыс. человек [3], в то же время по заявлению Министерства сельского хозяйства Российской Федерации для стабильного обновления кадрового состава требуется не менее 160 тыс. человек ежегодно [4]. При этом, в аналитическом материале о кадровом потенциале АПК, представленном Россельхозбанком, подчеркивается растущий спрос на технологические специальности при сохраняющейся высокой потребности в квалифицированных кадрах, что подтверждает рост инновационной активности в агросекторе [5]. Совокупность представленных факторов свидетельствует о необходимости систематизации полученных данных и востребованности перехода к долгосрочной кадровой политике, интегрированной с принципами устойчивого развития, где человеческий капитал рассматривается как стратегический ресурс, определяющий конкурентоспособность и адаптивность российского агропромышленного комплекса.

По своей совокупности государство и бизнес слишком велики и активны, чтобы отстраниться от проблем устойчивого развития. Несмотря на все санкционные ограничения наша страна продолжает следовать национальным целям развития до 2030 года [6] и Стратегии устойчивого развития сельских территорий, что является прямым соответствием следования международной практики, отраженной в Повестке дня устойчивого развития до 2030 года ООН и Целям устойчивого развития ООН.

Соответственно целью исследования выступает оценка влияния кадрового дефицита на устойчивость и эффективность агропромышленного комплекса России, а также в обосновании роли ESG-стратегий как инструмента повышения устойчивости, конкурентоспособности и социально-экономической стабильности сельских территорий. Объектом исследования выступают трудовые ресурсы агропромышленного комплекса России.

Условия, материалы и методы. Исследование взаимосвязи кадрового обеспечения агропромышленного комплекса с целями устойчивого развития позволяет выявить

ключевые барьеры и предложить механизмы политики, образовательных инициатив и корпоративных стратегий, которые могут повысить как эффективность и устойчивость сектора, так и социальную стабильность сельских территорий. В рамках работы применены методы эмпирического и компаративного сопоставления статистических данных, а также элементы структурно-функционального подхода, что позволило выявить типовые модели реакции предприятий агропромышленного комплекса на кадровые вызовы и определить степень интеграции ESG принципов в управленческие практики.

В этой связи в работе использовано теоретическое обобщение существующих позиций, одной из которых является высказывание Милтона Фридмана: «Все шире распространяется мнение, что на руководителях корпораций и профсоюзных лидерах лежит некая «социальная ответственность» помимо служения интересам их акционеров. Это мнение изобличает глубоко неверное представление о характере и природе свободной экономики. При такой экономике у бизнеса имеется одна и только одна социальная ответственность: увеличение своих прибылей» [7]. Так же на практике сегодняшнего дня мировая повестка характерна наличием определенной турбулентности, непостоянства и изменчивости, что предполагает изменение законов, правил и т.д. Эмпирический анализ показал, что некоторые компании продолжают относиться к подобной социальной ответственности (ESG) как к чему-то стороннему, навязанному внешними силами, очередной помехе «нормальному бизнесу» и вообще размышляют над тем, зачем заниматься ESG повесткой, когда западные рынки все равно закрыты [8]. При этом, необходимо отметить, меняется не только внешний мир, но и наша страна, а вместе с ней люди. С точки зрения стратегического управления необходимо стремиться отвечать глобальным вызовам, персоналу уже недостаточно небольшого повышения зарплаты, стоит определить положение дел на дальнюю перспективу, где ESG повестка не только источник проблем и ограничений, но и создатель новых правил игры, отрывающая дополнительные возможности [9].

Стоит отметить, что кадровая проблема сельских территорий не нова. Глубокий анализ был проведен в работах М.Р. Сафиуллина [10], А.А. Валерианова [11], Е.А. Скворцова [12], Л.А. Ельшина [13], Н.Ю. Ахапкин [14], А.Е. Шамина [15] и др. Фундаментальным исследованием считается работа К. Фостера, который предложил инструментарий для расчета индекса потенциала шокоустойчивости экономической системы [16], где рассматривает шокоустойчивость в двух плоскостях: готовность экономической системы к кризисам и эффективность реагирования. Центральное место в методологии данной парадигмы занимает дескриптивный анализ и

компаративное исследование статистических данных.

С целью развития методологических основ исследования устойчивости региональных систем мы предлагаем отдельно изучить способность хозяйств выдерживать как экзогенные негативные воздействия, такие как: климатические риски, биологические угрозы, регуляторные изменения, волатильность цен на энергоносители и другие, так и эндогенные, порождаемые самой деятельностью сельского хозяйства: истощение природных ресурсов, социальные и трудовые проблемы, которые являются следствием неэффективного управления рисками и отсутствия ESG подхода, слабая диверсификация производства, низкий уровень инноваций и технологий и другие. В связи с этим центральным элементом данного исследования становится разработка методики интеграции ESG принципов в систему управления сельскохозяйственным предприятием. Это позволит перейти от диагностики уязвимостей к созданию конкретного механизма повышения устойчивости.

В качестве ключевого драйвера повышения устойчивости сельского хозяйства рассматривается внедрение ESG-стратегий, благодаря которым предприятия получают растущую государственную поддержку в рамках федеральных программ развития АПК. Правительством Российской Федерации принят проект по повышению производительности труда с точечной поддержкой отдельных компаний, который затронет 40% предприятий несырьевых отраслей и все организации соцсферы. За шесть лет на эти цели власти потратят 30,5 млрд руб., производительность на этот срок должна вырасти на 21% против 8% за предыдущую шестилетку. Ожидается, что меры стимулирования затронут значительную часть агропредприятий, ориентированных на экспорт и устойчивые практики. Важно отметить, что при компаративном сопоставлении уровня внедрения ESG-практик в предприятия аграрного сектора, наблюдается значительная неравномерность. Наиболее высокие показатели встречаются в крупных агрохолдингах, которые демонстрируют прогресс в области экологизации производства и энергоэффективности, в то время как в сегменте малых и средних хозяйств распространенность ESG-подхода остается крайне низкой [17]. К тому же, положительные темпы роста производства продукции сельского хозяйства наблюдаются только в двух субъектах Приволжского федерального округа – Чувашии и Мордовии [11]. Понятно, что в условиях климатических изменений и растущих регуляторных требований проблемы внедрения устойчивых практик значительно усложняются. Решение этой задачи усугубляется санкционными ограничениями поставок современных агротехнологий и, как следствие, их значительным удорожанием.

В этих условиях в целях активизации

факторов, стоящих на стороне человеческой деятельности, дискутируются вопрос о расширении лимита сверхурочных часов для работников российских предприятий со 120 до 240 часов в год. Между тем, как следует из данных опроса hh.ru, почти треть россиян (29%) уже сейчас перерабатывает каждый день или почти каждый день. Около четверти (23%) делают это 2-3 раза в неделю, 12% – не реже раза в неделю, 17% – пару раз в месяц [18]. Самая перегруженная возрастная группа – это люди 45-54 лет, среди них перерабатывает 88% опрошенных. В остальных возрастных группах процент затронутых переработкой примерно одинаков, 79-80%, что косвенно подтверждает нехватку кадров на рынке труда [19]. По итогам 2024 года уровень безработицы в стране обновил исторический минимум в 2,5%, что, по существу, стало основанием для возникновения понятия «кадровый голод».

«Кадровый голод» и «утечка мозгов» из сельской местности создают для агробизнеса острую необходимость в новых инструментах привлечения и удержания персонала. В этом свете ESG-стратегия становится ключевым элементом в решении этой проблемы, трансформируя традиционные кадровые модели. Как известно, принципы ESG строятся на устойчивом развитии коммерческой деятельности обращая отдельное внимание на ответственное отношение к окружающей среде (англ., E – environment), на социальную ответственность, т.е. учитывать интересы общества (англ., S – social) и на качество корпоративного управления, которые затрагивают качество управления компаниями: прозрачность отчетности, зарплаты менеджмента, здоровую обстановку в офисах, отношения с акционерами, антикоррупционные меры (англ., G – governance). В этом смысле социальная составляющая ESG – улучшение условий жизни, забота о здоровье и развитие инфраструктуры в сельских территориях – напрямую влияет на снижение текучести кадров и формирование стабильного трудового коллектива. Экологическая и управленческая компоненты ESG создают мощные нематериальные стимулы. Участие работников во внедрении ресурсосберегающих технологий и построении прозрачной системы управления дает им ощущение сопричастности к миссии предприятия. В сельском хозяйстве, где труд носит часто сезонный и рутинный характер, такое чувство осмысленности и командного духа, на наш взгляд, способно стать важным фактором мотивации. В качестве наиболее релевантных направлений для E компонента в АПК видятся рациональное использование земельных ресурсов, сохранение плодородия почв, снижением антропогенной нагрузки и адаптация к климатическим изменениям. При этом, компаниям достаточно обратить внимание только на одно из направлений, что бы персонал ощутил сопричастность. Компонент S может включать

в себя развитие человеческого капитала, улучшение условий труда, жилищное обеспечение, развитие социальной инфраструктуры сельских территорий и в конечном итоге повышение привлекательности сельской занятости. Тогда как для G компонента в агропромышленном комплексе характерно больше формирование прозрачных моделей корпоративного управления, развитие кооперации, повышение эффективности цепочек создания добавленной стоимости.

Исследования показывают, что для будущих работников ключевым критерием выбора работодателя становится не только уровень заработной платы, но и ценностная совместимость с компанией [20, 21]. Работодатели, реализующие ESG-стратегии, демонстрируют заботу об обществе и сотрудниках, что усиливает их HR-бренд и снижает издержки на подбор персонала. Другое исследование показывает, что более 60% соискателей в России считают важным наличие у работодателя программы корпоративной ответственности и устойчивого развития [22]. Компании, внедряющие ESG-практики, получают преимущество в привлечении квалифицированных специалистов, особенно в условиях дефицита кадров на рынке труда.

Таким образом, в агропромышленном комплексе России ESG-подход приобретает особое значение, поскольку кадровая проблема является одной из наиболее острых для отрасли. По данным Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, ежегодные потери рабочей силы в АПК составляют 150 тыс. человек, тогда как для стабильного обновления кадрового состава требуется не менее 160 тыс. человек в год. Причинами, как указывают в министерстве, являются миграционный отток молодежи из сельских территорий, низкий уровень социальной инфраструктуры и ограниченные возможности профессионального роста [4]. Думается, что ключевым направлением здесь является жилищное обеспечение. Так, например, в Республике Татарстан и Белгородской области действуют программы льготного ипотечного кредитования и предоставления служебного жилья для специалистов агропромышленного комплекса. Эти меры рассматриваются нами как элемент социальной составляющей ESG, направленный на повышение привлекательности сельской жизни. В 2023 году в Республике Татарстан в рамках программы «Агростартап» и национального проекта «Малое и среднее предпринимательство» было зарегистрировано всего 80 участников, из которых только 35 человек получили финансовое обеспечение затрат, связанных с реализацией проектов создания и (или) развития хозяйств в целях развития среднего и малого предпринимательства в сфере сельского хозяйства [23]. Полученные данные свидетельствуют о поддержке Правительством Российской Федерации и субъектами РФ агропромышленного

комплекса, при этом, думается, что осуществление поддержки самими предприятиями АПК остается на низком уровне.

Результаты и обсуждение. Республика Татарстан демонстрирует относительно высокий уровень развития АПК. Однако анализ

статистических данных за 2017-2023 годы и государственных программ позволяет выявить ряд тревожных тенденций, характеризующих динамику трудоустроенности аграрного сектора Республики Татарстан, отраженных в таблице 1.

Таблица 1- Востребованность кадров сельском хозяйстве в Республике Татарстан [24]

Table 1 – Demand for personnel in agriculture in the Republic of Tatarstan [24]

Показатель	Годы						
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Среднегодовая численность занятых, тыс. человек	1945,1	1944,3	1941,3	1938,8	1985,8	1993,6	2036,5
Среднегодовая численность занятых непосредственно в сельском, лесном хозяйстве, охота, рыболовство и рыбоводство, тыс. человек	188,5	151,3	176,3	142,6	140,1	138,5	136,8
Потребность в рабочих местах в сельском хозяйстве, рабочих мест [25]	540	442	329	862	419	644	817

Как видно из таблицы 1, среднегодовая численность занятых в экономике региона в динамике демонстрирует умеренный рост, особенно в постпандемный период, что свидетельствует об экономической активности в регионе. При этом, среднегодовая численность занятых непосредственно в сельском, лесном хозяйстве, охоте, рыболовстве и рыбоводстве снижается на 27,4%, что косвенно может свидетельствовать о нарастающем кадровом дефиците. Данная гипотеза подтверждается выявленной динамикой показателя потребности в рабочих местах в

сельском хозяйстве, которая на 2023 год составила 817 рабочих мест. Несмотря на свой колебательный характер данный показатель демонстрирует несоответствие между имеющимся трудовым потенциалом и потребностями сельскохозяйственных организаций. Подобная статистика характерна как для многих регионов России, так и для развитых и развивающихся стран. В таблице 2 нами был проведен анализ возрастной структуры сельского населения за период 2017-2023 годы, который позволил выявить значимые статистические тенденции.

Таблица 2 - Распределение сельского населения по возрастным группам в Республике Татарстан, человек [26]

Table 2 – Distribution of the rural population by age groups in the Republic of Tatarstan, persons [26]

Возраст сельского населения	Годы						
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
0-4	55146	50668	46294	45946	43669	41890	40646
5-9	49802	51589	53235	55997	56473	56404	54080
10-14	45369	45212	45971	47458	49501	52235	54823
15-19	47904	47000	45739	44311	43863	43662	43893
20-24	55004	54916	54339	50765	49136	47093	46738
25-29	63754	59493	56369	57078	54824	53319	52265
30-34	55998	59574	61848	67080	68629	68378	65401
35-39	50540	49469	50054	54738	57447	61928	66246
40-44	58256	56934	55869	57134	56326	55806	55724
45-49	64084	62503	60882	62433	61902	62103	61208
50-54	74373	72387	70116	70641	69003	66905	65744
55-59	74758	76190	77258	80954	78750	77604	74992
60-64	58544	61225	64603	71210	75488	78602	79977
65-69	43452	45854	47768	52065	55362	58225	61310
70 и старше	112045	110701	109807	107568	106351	105015	107222

Необходимо отметить, что при снижении среднегодовой численности занятых в сельском хозяйстве, общая численность сельского населения имеет тенденцию к увеличению. На основе данных видно, имеющуюся волнообразную динамику, наблюдающуюся в возрастной группе 50-54 лет и 55-59 лет, что, на

наш взгляд, отражает постпандемный характер, пришедший на 2020 год. Думается, что последующий рост обуславливается путем освоения новых форм занятости, перераспределения рабочей силы в торговую и социальную сферу, в бюджетные организации и иные несельскохозяйственные виды

деятельности. Также наблюдается сокращение молодежных возрастных групп 20-24 лет и 25-29 лет и детей 0-4 года, и рост числа старших возрастных групп 60-64 лет и 65-69 лет, что говорит о снижении потенциала воспроизводства трудовых ресурсов. Одновременно с этим в агропромышленном комплексе происходит концентрация производства, когда мелкие и неэффективные хозяйства разоряются или поглощаются крупными агрохолдингами, которые способны использовать ресурсы более эффективно, что приводит к сокращению числа наемных рабочих, но при этом дефицит кадров в существующих организациях сохраняется, а в некоторых случаях способен даже усиливаться благодаря возросшим требованиям к предъявляемым к квалификации рабочих.

Для подтверждения данной гипотезы мы проанализировали зависимость валового регионального продукта (ВРП) от заработной платы и доли занятых в сельском хозяйстве от среднегодовой численности занятого населения в регионе в сфере сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство в 81 субъекте Российской Федерации с 2017 по 2023 годы [2]. Взаимосвязь этих показателей описывается уравнением линейной зависимости (1):

$$\ln(y) = -1,30 + 1,39\ln(x_1) + 0,035\ln(x_2), \quad (1)$$

где y – валовой региональный продукт на душу населения, рублей;

x_1 – средняя заработная плата по региону, рублей;

x_2 – доля занятых в сельском хозяйстве от среднегодовой численности занятого населения в регионе, %.

Для приведения факторов к единой размерности x_1 и x_2 были прологарифмированы. Коэффициент линейной корреляции данного уравнения достаточно высок (0,83), что означает значимое изменение показателя валового регионального продукта при изменении заработной платы и доли занятых в сельском хозяйстве. При этом, сила влияния заработной платы (1,39) кардинально отличается от влияния доли занятого населения в сельском хозяйстве (0,035).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что для роста ВРП правительству, региональным властям и предприятиям агропромышленного комплекса следует концентрироваться не на простом увеличении числа работников в сельском хозяйстве, а на мерах, которые ведут к росту заработной платы. При этом, мы убеждены, что драйвером к повышению заработной платы являются: внедрение современных технологий и автоматизация, повышение квалификации кадров, развитие эффективных цепочек создания стоимости и кооперации и переходу к производству продукции с высокой добавленной стоимостью. Что позволит перейти от экстенсивной модели роста к интенсивной.

В условиях значительного роста цен на

современную сельскохозяйственную технику, а также ожидаемых сложностей, связанных с её освоением, определённую актуальность приобрели модели, основанные на экстенсивном расширении объемов производства. Основное внимание при этом уделяется увеличению объёмов выпуска за счёт более широкого использования техники предыдущих поколений. Такой подход предполагает рост численности рабочих мест и, соответственно, увеличение штата производственного персонала. Преимущества данного метода заключаются в сравнительно низкой стоимости традиционных машин и меньших расходах на подготовку специалистов, способных их обслуживать. Однако, в условиях ситуации «кадрового голода» возникают неожиданные последствия применения такого подхода даже несмотря на то, что расходы на закупку техники и строительство новых производственных помещений соответствуют установленным плановым показателям. В условиях «кадрового голода» резко возрастают затраты на подбор и удержание персонала, а также начинает стремительно расти уровень заработной платы представителей рабочих профессий. В связи с этим, предприятиям требуется значительно повысить заработную плату действующему персоналу и, соответственно, новым работникам. Ожидания постепенного насыщения рынка труда и роста предложения квалифицированных специалистов оказались нереалистичными. В результате рост трудовых издержек стал одним из ключевых факторов снижения рентабельности производства, что поставило под сомнение эффективность применения экстенсивных моделей развития в современных социально-экономических условиях.

В случае модели интенсификации производства ключевым направлением выступает внедрение современной техники и технологий. Несмотря на объективные трудности, сопровождающие реализацию инновационной политики, её последовательное проведение формирует долгосрочные стратегические возможности для развития производственного потенциала, а также отвечает критериям ESG стратегии. Кроме решения сложных финансовых вопросов, связанных с инновационным обновлением производства, требуется еще и разработка специальных программ по развитию человеческого капитала. Основной целью таких программ является формирование и укрепление компетенций, необходимых как для эффективного управления высокотехнологичным оборудованием, так и для поддержания устойчивого функционирования всей производственной системы. Кроме того, успешная реализация инновационных процессов невозможна без освоения цифровых инструментов управления и анализа данных, которые сегодня становятся неотъемлемым элементом производственной среды. Использование цифровых технологий обеспечивает повышение эффективности управления, способствует

оперативному принятию решений и является ключевым фактором обеспечения устойчивого и динамичного роста производственных систем в условиях современной экономики.

Таким образом, в условиях кадрового дефицита в российской экономике становится очевидной необходимость перехода от экстенсивных к интенсивным методам развития производства. Не отрицая значимости экстенсивных методов развития в определённых экономических условиях, следует подчеркнуть, что современная социально-экономическая среда ограничивает потенциал их применения. Результаты проведённого анализа свидетельствуют о том, что традиционные подходы к повышению производительности труда утрачивают способность обеспечивать требуемый уровень эффективности. Экстенсивные модели, ориентированные преимущественно на количественное расширение производственных ресурсов и увеличение численности занятых, в условиях дефицита кадрового потенциала приводят к росту издержек и снижению рентабельности производства. В противовоположность этому, интенсивные стратегии развития, основанные на цифровизации управленческих и технологических процессов, внедрении инновационного оборудования и целенаправленном развитии человеческого капитала, демонстрируют более высокую устойчивость и эффективность. Особое значение при переходе к интенсивным моделям приобретает органичная интеграция с ESG стратегией компании. Применение цифровых технологий в управлении и организации производства способствует формированию новых профессиональных компетенций, соответствующих требованиям технологической трансформации. Эти компетенции нередко приобретают гибридный характер, сочетая элементы традиционных производственных навыков с цифровыми и аналитическими компетенциями, что обеспечивает повышение адаптивности и инновационной способности персонала. Все это отвечает критериям устойчивого развития. В частности, цифровизация производственных процессов способствует снижению экологической нагрузки за счёт ресурсосбережения и оптимизации энергопотребления, что соответствует экологическому компоненту (E) стратегии. Развитие человеческого капитала, формирование безопасных и комфортных условий труда, а также обеспечение равных возможностей профессионального роста отражают социальный аспект (S) ESG. В свою очередь, внедрение прозрачных управленческих механизмов, цифровых систем контроля и анализа данных реализует управленческое измерение (G) устойчивого развития. Интеграция ESG-стратегии в интенсивные модели хозяйствования формирует новую парадигму экономического роста, в которой эффективность производства рассматривается не только через призму прибыли, но и через устойчивость, инновационность и социальную значимость

деятельности. Применение цифровых технологий в управлении и организации производственных процессов способствует формированию новых гибридных компетенций, сочетающих традиционные профессиональные навыки с цифровыми и аналитическими способностями, что повышает адаптивность и инновационный потенциал трудовых коллективов. В результате интенсивное развитие, дополненное принципами ESG, становится ключевым инструментом повышения конкурентоспособности и устойчивости отечественной экономики, обеспечивая сбалансированное сочетание экономических, социальных и экологических интересов.

Выводы. Проведенное исследование показало, что устойчивое развитие агропромышленного комплекса России в современных социально-экономических условиях невозможно без перехода от экстенсивных к интенсивным моделям хозяйствования, интегрирующим принципы ESG. В условиях санкционного давления, кадрового дефицита и технологических ограничений именно ESG подход позволяет обеспечить системную трансформацию сельского хозяйства, направленную на повышение производительности, экологизацию производства и формирование новых профессиональных компетенций. Интеграция ESG принципов в деятельность аграрных предприятий позволяет рассматривать эффективность производства не только через призму финансовых результатов, но и с позиции социальной и экологической устойчивости. Экологический компонент способствует ресурсосбережению, повышению энергоэффективности, в свою очередь социальный компонент направлен на укрепление кадрового потенциала, развитие инфраструктуры сельских территорий и повышение качества жизни работников, а управленческий аспект обеспечивает прозрачность и ответственность в принятии решений.

В современных условиях хозяйствования ESG повестка становится не внешним требованием, а внутренней потребностью в повышении конкурентоспособности предприятий. В этой связи приоритетными направлениями предприятий агропромышленного комплекса должны стать внедрение цифровых решений для повышения производительности, развитие корпоративных программ обучения и переподготовки специалистов, а также формирование привлекательной социальной среды в сельских территориях, включая жильё, транспортную и образовательную инфраструктуру.

Таким образом, стратегическая интеграция ESG в интенсивное развитие аграрного производства становится ключевым направлением формирования устойчивой, конкурентоспособной и социально ответственной модели агропромышленного комплекса России.

Сведения о финансировании. Работа выполнена за счёт гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам)

с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях

Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан».

Литература

1. Указ Президента РФ от 21.01.2020 № 20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации» // СПС «ГАРАНТ». URL: <https://base.garant.ru/73438425/> (дата обращения: 04.08.2025).
2. Регионы России. Социально-экономические показатели. Росстат. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204> (дата обращения: 15.08.2025).
3. Новикова Анастасия Назван сектор российской экономики с существенным дефицитом кадров // Газета.ru от 27.01.2025. URL: <https://www.gazeta.ru/business/news/2025/01/27/24933218.shtml?updated> (дата обращения: 04.08.2025).
4. Лут Оксана. Пленарное заседание Всероссийского форума «Перспективные тенденции аграрного образования и науки», Ставрополь [Электронный ресурс] // Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. URL: <https://mcx.gov.ru/press-service/news/plyamaya-translyatsiya-plenarnogo-zasedaniya-vserossiyskogo-foruma-perspektivnye-tendentsii-agrarnogo/> (дата обращения: 12.09.2025).
5. РСХБ представил портрет соискателей в АПК на круглом столе выставки «Золотая осень» / «Кадры для АПК: текущее состояние и перспективы» [Электронный ресурс] // АО Россельхозбанк. URL: <https://www.rshb.ru/news/10102025-000002> (дата обращения: 10.10.2025).
6. Единый план по достижению национальных целей развития Российской Федерации до 2030 года и на перспективу до 2036 года [Электронный ресурс] // Официальный сайт Правительства Российской Федерации. URL: <http://static.government.ru/media/files/ZsnFICpxWknEXeTfQdmcFHNi2FhcR0A.pdf> (дата обращения: 04.08.2025).
7. Фридман М. Капитализм и свобода / Милтон Фридман; [пер. с англ. Владимир Козловский]. Москва: Фонд Либер. миссия, Новое изд-во, 2006. 236 с.
8. Мустафина А. С., Бакин И. А. Реализация принципов ESG в бизнес-планировании инвестиционных проектов агропромышленного комплекса // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2023. № 5. С. 101-114. doi: 10.26897/0021-342X-2023-5-101-114.
9. Ситдикова Л. Ф. Развитие аграрного сектора экономики в условиях влияния внешних факторов // Экономика сельского хозяйства России. 2025. № 2. С. 56-65. doi: 10.32651/252-56.
10. Оценка перспектив экономического роста регионов России в условиях санкционных ограничений импорта / М. Р. Сафиуллин, Р. Т. Бурганов, Л. А. Ельшин, А. М. Мингулов // Экономика региона. 2023. Т. 19. № 4. С. 1003-1017. doi: 10.17059/ekon.reg.2023-4-5.
11. О мерах государственной поддержки и регулирования АПК / А. А. Валерианов, Н. В. Алексеева, Т. А. Медведева и др. // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16. № 4(64). С. 75-81. doi: 10.12737/2073-0462-2022-75-81.
12. Сковорцов Е. А., Сковорцова Е. Г., Чепуштанова О. В. Устойчивое развитие отечественного сельского хозяйства и самообеспеченность населения продуктами питания в условиях санкций // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2024. № 8. С. 77-82. doi: 10.31442/0235-2494-2024-0-8-77-82.
13. Ельшин Л. А., Шарапов А. Р., Мингулов А. М. Стратегическая адаптация аграрных регионов к внешним конъюнктурным изменениям // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2025. Т. 20. № 1(77). С. 109-118. doi: 10.12737/2073-0462-2025-1-109-118.
14. Ахапкин Н. Ю. Российская экономика в условиях санкционных ограничений: динамика и структурные изменения // Вестник Института экономики Российской академии наук. 2023. № 6. С. 7-25. doi: 10.52180/2073-6487_2023_6_7_25.
15. Digital transformation of agricultural industry / A. Shamin, O. Frolova, V. Makarychev [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Macau, 21-24 июля 2019 года. Vol. 346. Macau: Institute of Physics Publishing, 2019. P. 012029. doi: 10.1088/1755-1315/346/1/012029.
16. Foster K. A. A case study approach to understanding regional resilience. Institute of urban and regional development, University of California, Berkeley, Working Paper. 2007. URL: <https://escholarship.org/uc/item/8t02163> (дата обращения: 12.08.2025).
17. Shinkevich A. I., Akhmetshina A. R., Khalilov R. R. Development of a Methodology for Forecasting the Sustainable Development of Industry in Russia Based on the Tools of Factor and Discriminant Analysis // Mathematics. 2022. Vol. 10, No. 6. doi: 10.3390/math10060859.
18. Hh.ru Как перестать перерабатывать и начать жить. URL: https://hh.ru/article/305531?hhtmlFrom=article_search&customDomain=1 (дата обращения: 10.08.2025).
19. Miasnikov D. A., Mikhailov F., Digital Technologies in the Personnel Management System in Conditions of Personnel Shortage // Lecture Notes in Networks and Systems. 2025. Vol. 1552 LNNS, Is. P. 153-160. doi: 10.1007/978-3-031-99598-9_23.
20. PwC. Исследование «Организации на рынке труда будущего: готовимся к завтрашнему дню сегодня». URL: <https://www.pwc.com/kz/ru/publications/publications-new/preparing-for-tomorrows-workforce-today.html> (дата обращения: 15.08.2025).
21. Informatization Impact on Social and Economic Development of the Region / Y. S. Kolesnikova, N. I. Larionova, E. R. Valeev, D. N. Frantasov // Economic Systems in the New Era: Stable Systems in an Unstable World / Editors: Svetlana Igorevna Ashmarina, Jakub Horák, Jaromír Vrbka, Petr Šuleř. Cham: Springer Nature, 2021. P. 840-845. doi: 10.1007/978-3-030-60929-0_108.
22. Центр устойчивого развития Школы управления СКОЛКОВО. Исследование «Молодое поколение как драйвер ESG-трансформации». URL: <https://www.skolkovo.ru/researches/molodoe-pokolenie-kak-drajv-esg-transformacii/> (дата обращения: 15.08.2025).
23. Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Татарстан. Грантовая поддержка КФХ «Агростартап». URL: <https://agro.tatarstan.ru/2024-7803849.htm> (дата обращения: 15.08.2025).

24. Труд и занятость в России. 2023: Стат. сб./Росстат - М., 2023. – 180 с. URL: https://www.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Trud_2023.pdf (дата обращения: 15.08.2025).
25. Потребность экономики субъектов РФ в профессиональных кадрах. Портал «Работа России» — федеральная государственная информационная система Федеральной службы по труду и занятости. URL: https://trudvsem.ru/information/prediction/portal_prediction/needs_professionals (дата обращения: 15.08.2025).
26. Республика Татарстан, статистический сборник 2022. Татарстанстат, г. Казань, 2023. – 294 с. URL: [https://16.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Ежегодник_2023\(1\).pdf](https://16.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Ежегодник_2023(1).pdf) (дата обращения: 15.08.2025).

References

1. Decree of the President of the Russian Federation of January 21, 2020 No.20, On approval of Food Security Doctrine of the Russian Federation. [Internet]. SPS GARANT. [cited 2025, August 4]. Available from: <https://base.garant.ru/73438425/>.
2. Regions of Russia. Social and economic indicators. Rosstat. Regiony Rossii. Sotsial'no-ekonomicheskie pokazateli. [Internet]. Rosstat. [cited 2025, August 15]. Available from: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204>.
3. Anastasiya Novikova. The sector of the Russian Economy with a significant labor shortage has been named. [Internet]. Gazeta.ru ot 27.01.2025. [cited 2025, August 4]. Available from: <https://www.gazeta.ru/business/news/2025/01/27/24933218.shtml?updated>.
4. Oksana Lut. Plenary session of All-Russian forum “Promising trends in agricultural education and science”, Stavropol. [Internet]. Ministry of Agriculture of the Russian Federation. [cited 2025, September 12]. Available from: <https://mcx.gov.ru/press-service/news/pryamaya-translyatsiya-plenarnogo-zasedaniya-vserossiyskogo-foruma-perspektivnye-tendentsii-agrarnog/>.
5. Russian Agricultural Bank presented a portrait of applicants for agro-industrial complex at the round table of “Zolotaya osen” exhibition. Personnel for agro-industrial complex: current status and prospects. [Internet]. AO Ros-selkhozbank. [cited 2025, October 10]. Available from: <https://www.rshb.ru/news/10102025-000002>.
6. Unified plan for achieving the national development goals of the Russian Federation until 2030 and for the period up to 2036. [Internet]. Official website of Russian Federation Government. [cited 2025, August 4]. Available from: <http://static.government.ru/media/files/ZsnFICpxWknEXeTfQdmcFHNei2FhcR0A.pdf>.
7. Fridman M. Kapitalizm i svoboda. [Capitalism and freedom: translated from English by Vladimir Kozlovskiy]. Moscow: Fond Liber. missiya, Novoe izd-vo, 2006; 236 p.
8. Mustafina AS, Bakin IA. [Implementation of ESG principles in business planning of investment projects in the agro-industrial complex]. Izvestiya Timiryazevskoy selskokhozyaystvennoy akademii. 2023; 5. 101-114 p. doi: 10.26897/0021-342X-2023-5-101-114.
9. Sitdikova LF. [Development of agricultural sector of the economy under the influence of external factors]. Ekonomika selskogo khozyaystva Rossii. 2025; 2. 56-65 p. doi: 10.32651/252-56.
10. Safiullin MR, Burganov RT, Elshin LA, Mingulov AM. [Assessing the prospects for economic growth in Russian regions under the conditions of sanction restrictions on imports]. Ekonomika regiona. 2023; Vol.19. 4. 1003-1017 p. doi: 10.17059/ekon.reg.2023-4-5.
11. Valerianov AA, Alekseeva NV, Medvedeva TA. [On measures of state support and regulation of the agro-industrial complex]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021; Vol.16. 4(64). 75-81 p. doi: 10.12737/2073-0462-2022-75-81.
12. Skvortsov EA, Skvortsova EG, Chepushtanova OV. [Sustainable development of domestic agriculture and self-sufficiency of the population in food products under sanctions]. Ekonomika selskokhozyaystvennykh i pererabatyvayushchikh predpriyatiy. 2024; 8. 77-82 p. doi: 10.31442/0235-2494-2024-0-8-77-82.
13. Elshin LA, Sharapov AR, Mingulov AM. [Strategic adaptation of agrarian regions to external market changes]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2025; Vol.20. 1(77). 109-118 p. doi: 10.12737/2073-0462-2025-1-109-118.
14. Akhapkin NYu. [Russian economy under sanctions restrictions: dynamics and structural changes]. Vestnik Instituta ekonomiki Rossiyskoy akademiy nauk. 2023; 6. 7-25 p. doi: 10.52180/2073-6487_2023_6_7_25.
15. Shamin A, Frolova O, Makarychev V. Digital transformation of agricultural industry. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Macau, 21-24 iyulya 2019 goda. Vol.346. Macau: Institute of Physics Publishing. 2019; 012029 p. doi: 10.1088/1755-1315/346/1/012029.
16. Foster KA. A case study approach to understanding regional resilience. Institute of urban and regional development, University of California, Berkeley, Working Paper. [Internet]. 2007; [cited 2025, August 12]. Available from: <https://escholarship.org/uc/item/8tt02163>.
17. Shinkevich AI, Akhmetshina AR, Khalilov RR. Development of a methodology for forecasting the sustainable development of industry in Russia based on the tools of factor and discriminant analysis. Mathematics. 2022; Vol.10. No.6. doi: 10.3390/math10060859.
18. How to stop overworking and start living. [Internet]. Hh.ru. [cited 2025, August 10]. Available from: https://hh.ru/article/305531?htmlFrom=article_search&customDomain=1.
19. Myasnikov DA, Mikhaylov F. Digital technologies in the personnel management system in conditions of personnel shortage. Lecture notes in networks and systems. 2025; Vol.1552. LNNS. Is. 153-160 p. doi: 10.1007/978-3-031-99598-9_23.
20. Research “Organizations in the labor market of future: preparing for tomorrow today”. [Internet]. PwC. [cited 2025, August 15]. Available from: <https://www.pwc.com/kz/ru/publications/publications-new/preparing-for-tomorrows-workforce-today.html>.
21. Kolesnikova YS, Larionova NI, Valeev ER, Frantsov DN. Informatization impact on social and economic development of the region. Economic systems in the new era: stable systems in an unstable world. Editors: Svetlana Igorevna Ashmarina, Jakub Horak, Jaromir Vrbka, Petr Suler. Cham: Springer Nature. 2021; 840-845 p. doi: 10.1007/978-3-030-60929-0_108.
22. Center for sustainable development, SKOLKOVO School of Management. Study “The younger generation as a driver of ESG transformation”. [Internet]. Skolkovo. [cited 2025, August 15]. Available from: <https://www.skolkovo.ru/researches/molodoe-pokolenie-kak-drajv-esg-transformacii/>.

23. Grant support for Agrostartup peasant farm. [Internet]. Ministry of Agriculture and Food of the Republic of Tatarstan. [cited 2025, August 15]. Available from: <https://agro.tatarstan.ru/2024-7803849.htm>.

24. Labor and employment in Russia. 2023: statistical collection/trud i zanyatost v Rossii. [Internet]. Rosstat. 2023; Moscow. 180 p. [cited 2025, August 15]. Available from: https://www.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Trud_2023.pdf.

25. Demand of professional personnel in the economics of Russian Federation. [Internet]. Portal “Rabota Rossii” - federalnaya gosudarstvennaya informatsionnaya sistema Federalnoy sluzhby po trudu i zanyatosti. [cited 2025, August 15]. Available from: https://trudvsem.ru/information/prediction/portal_prediction/needs_professionals.

26. Republic of Tatarstan, Statistical Digest 2022. [Internet]. Tatarstanstat. Kazan. 2023; 294 p. [cited 2025, August 15]. Available from: [https://16.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Ezhegodnik_2023\(1\).pdf](https://16.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Ezhegodnik_2023(1).pdf).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Мясников Дмитрий Алексеевич – кандидат экономических наук, доцент кафедры управления человеческими ресурсами Казанского (Приволжского) федерального университета (420008, Россия, Казань, Кремлёвская улица, 18, корп. 1), e-mail: dmitriymasnikov@mail.ru, ORCID 0000-0003-0253-3305

Ягудина Елена Валерьевна – доктор экономических наук, профессор, заведующая кафедрой управления человеческими ресурсами Казанского (Приволжского) федерального университета (420008, Россия, Казань, Кремлёвская улица, 18, корп. 1), e-mail: efahr@mail.ru, ORCID 0000-0003-0293-8599

Вклад авторов:

Д.А. Мясников – концептуализация, методология, программное обеспечение, формальный анализ, исследование, контроль данных, написание – первоначальный проект, визуализация, администрирование проекта, получение финансирования;

Е.В. Ягудина – валидация, предоставление исследовательских материалов, редактирование текста.

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 14.10.2025; одобрена после рецензирования 13.03.2026; принята к публикации 01.04.2026.

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

Authors:

Miasnikov Dmitrii Alekseevich – Ph.D. of Economic Sciences, Associate Professor of Department of Human Resource Management Kazan (Volga Region) Federal University (18 Kremlyovskaya Street, Building 1, Kazan, 420008, Russia), e-mail: dmitriymasnikov@mail.ru, ORCID 0000-0003-0253-3305

Yagudina Elena Valerevna – Doctor of Economic Sciences, Professor, Head of Department of Human Resource Management Kazan (Volga Region) Federal University (18 Kremlyovskaya Street, Building 1, Kazan, 420008, Russia), e-mail: efahr@mail.ru, ORCID 0000-0003-0293-8599

Contribution of the authors:

D.A. Miasnikov – Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Investigation, Data curation, Writing – original draft, Visualization, Project administration, Funding acquisition;

E.V. Yagudina — Validation, Provision of research materials, Text editing.

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 14.10.2025; revised 13.03.2026; accepted 01.04.2026.



**ВЛИЯНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ИМПОРТА НА ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
АГРАРНОГО СЕКТОРА ЭКОНОМИКИ РЕГИОНА**

© 2026 Сафиуллин М. Р.^{1,2}, Шарапов А. Р.³, Ельшин Л. А.^{1,4}✉, Абдрахманова Д. Р.³

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет

(г. Казань, Российская Федерация)

²Академия наук Республики Татарстан

(г. Казань, Российская Федерация)

³Поволжский государственный университет физической культуры, спорта и туризма

(г. Казань, Российская Федерация)

⁴Центр перспективных экономических исследований Академии наук Республики Татарстан

(г. Казань, Российская Федерация)

✉ Leonid.Elshin@tatar.ru

Реферат. В условиях повышенной турбулентности в системе внешнеторговых связей в мировой экономике с новой силой актуализировались вопросы, связанные с разработкой моделей, оценивающих степень влияния импортоуязвимости на перспективы развития регионально-отраслевых комплексов. Несмотря на достаточно высокий уровень проработки данного научно-исследовательского вопроса, следует констатировать о необходимости дальнейшего развития методических подходов в этой сфере. Требуется усиление внимания к построению подобного класса моделей с учетом акцентирования внимания на региональный и отраслевой исследовательский уровень. Кроме того, усиливающаяся для ряда стран блокада доступа к внешним рынкам, предопределяет необходимость адаптации методического инструментария в сфере исследования факторов импортозамещения и их включение в процессы конструирования моделей отраслевого развития. Руководствуясь рассмотренными аспектами, в проведенном исследовании выявлена степень чувствительности агропромышленного сектора Республики Татарстан к коррекции критического импорта, используемого в хозяйственной деятельности сельскохозяйственных предприятий региона (Республики Татарстан). К данной категории, используя методы многофакторного анализа, была отнесена номенклатурная группа ТНВЭД 8433 «Машины или механизмы для уборки или обмолота сельскохозяйственных культур, включая пресс-подборщики, прессы для упаковки в кипы соломы или сена; сенокосилки или газонокосилки; машины для очистки, сортировки или калибровки яиц, плодов». Установлено, что сокращение импорта исследуемой товарной номенклатуры на 1% влечет за собой снижение объема отгруженных товаров собственного производства в агропромышленном секторе исследуемого субъекта РФ на 0,39%. Элементы научной новизны выражаются в авторском подходе к идентификации критического импорта для сельскохозяйственного сектора экономики региона и разработке на этой основе прогностической модели развития отрасли с учетом потенциальных рисков в виде ограничения поставок критически значимых товарных позиций.

Ключевые слова: аграрный сектор экономики, регион, критический импорт, санкционные ограничения, сценарное прогнозирование, моделирование макроэкономических связей, трансформация внешних рынков.

Для цитирования: Влияние критического импорта на перспективы развития аграрного сектора экономики региона / М.Р. Сафиуллин, А.Р. Шарапов, Л.А. Ельшин, Д.Р. Абдрахманова // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2026. Т. 21. № 1(81). С. 173-182. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-173-182

**IMPACT OF CRITICAL IMPORTS ON THE DEVELOPMENT PROSPECTS OF
REGIONAL AGRICULTURAL SECTOR**

Safiullin M. R.^{a,b}, Sharapov A. R.^c, Elshin L. A.^{a,d}✉, Abdrakhmanova D. R.^c

^aKazan (Volga Region) Federal University

(Kazan, Russian Federation)

^bAcademy of Sciences of the Republic of Tatarstan

(Kazan, Russian Federation)

^cVolga Region State University of Physical Education, Sports and Tourism

(Kazan, Russian Federation)

^dCenter for advanced economic research of Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan

(Kazan, Russian Federation)

✉ Leonid.Elshin@tatar.ru

Abstract. In the context of increased turbulence in the global economic system, issues related to the development of models assessing the impact of import vulnerability on the development prospects of

regional and industrial complexes have become increasingly relevant. Despite the relatively high level of elaboration of this research question, it should be noted that further development of methodological approaches in this area is necessary. Greater attention is required to the development of such models, with a focus on the regional and industrial research levels. Furthermore, the increasing blockade of access to foreign markets for a number of countries necessitates the adaptation of methodological tools for studying import substitution factors and their inclusion in the design of industrial development models. Based on the factors examined, the study identified the sensitivity of agro-industrial sector of the Republic of Tatarstan to adjustments in critical imports used in the economic activities of agricultural enterprises in the region (the Republic of Tatarstan). Using multivariate analysis methods, the HS nomenclature group 8433 "Machines or mechanisms for harvesting or threshing agricultural crops, including balers, presses for packing straw or hay into bales; mowing machines or lawn mowers; machines for cleaning, sorting, or grading eggs or fruit" was assigned to this category. It was found that a 1% reduction in imports of the studied product nomenclature entails a 0.39% decrease in the volume of shipped goods of own production in the agro-industrial sector of the studied constituent entity of the Russian Federation. Elements of scientific novelty are expressed in the author's approach to identifying critical imports for the regional agricultural sector and, based on this, developing a predictive model for the sector's development, taking into account potential risks in the form of supply restrictions for critically important commodities.

Key words: agricultural sector, region, critical imports, sanctions restrictions, scenario forecasting, modeling macroeconomic relationships, transformation of foreign markets.

For citation: Safiullin MR, Sharapov AR, Elshin LA, Abdrakhmanova DR. [Impact of critical imports on the development prospects of regional agricultural sector]. *Vestnik of Kazan State Agrarian University*. 2026; Vol. 21. 1(81). 173-182 p. doi: 10.31588/2073-0462-2026-21-1-173-182

Введение. Современные геоэкономический и геополитический ландшафты характеризуются повышенным уровнем волатильности в сфере развития международных кооперационных связей. Стремление к достижению национальных целей приводит в ряде стран к применению внерыночных инструментов регулирования своей внешнеэкономической деятельности. Это проявляется в наращивании тарифов и таможенных платежей, усиливающих тенденций в сфере активизации применения инструментов санкционного ограничения, формирования иных заградительных барьеров в рамках реализации отдельными юрисдикциями конъюнктурных внешнеполитических целей и т.п. В этих условиях важнейшей задачей становится разработка стратегий развития национальных, региональных и отраслевых экономических систем к данному рода пертурбациям. Это, в свою очередь, предопределяет необходимость разработки адаптированного к изменяющимся условиям инструментария, позволяющего диагностировать зарождающиеся угрозы и разрабатывать на этой основе форсайт-решения в сфере построения эффективных моделей развития в новых условиях хозяйствования. При этом их реализацию целесообразно производить на уровне отраслевых экономических систем. Данный подход, солидаризируясь с позицией Новиковой Т. С. [1], обусловлен принципами системного анализа, предусматривающего необходимость при выработке механизмов комплексного развития учитывать состояние отдельных элементов системы. Понимание отраслевых особенностей реагирования к процессам внешнеэкономической турбулентности формирует базис для их агрегирования в единую повестку реализации политики импортозамещения на региональном и национальном уровне

в условиях динамично формирующихся институционально-конъюнктурных изменений.

Придерживаясь представленного подхода, предусматривающего необходимость актуализации и разработки моделей развития отраслевых экономических систем через призму выработки адаптированных к трансформирующимся условиям хозяйствования программ импортозамещения, в настоящем исследовании предпринимается попытка решения поставленных вопросов на уровне агропромышленного сектора экономики региона. В концентрированной форме цель исследования формулируется как разработка методического инструментария, формирующего основу для оценки влияния критического импорта для агропромышленного сектора экономики региона на перспективы развития отрасли в условиях внешних ограничений.

Индустрия сельского хозяйства является ключевой отраслью национальной экономики РФ и целого ряда ее регионов, включая и Республику Татарстан. Аграрный сектор, выступая в роли стратегической отрасли, формирует базовые основы для экономического развития, роста уровня и качества жизни населения [2, 3, 4]. Между тем, в условиях повышенной турбулентности на внешних рынках, связанных, в частности, с усиливающимися процессами конкурентной борьбы между отдельными странами и политическими блоками, интенсификацией торговых войн, набирающими обороты санкционных атак, индустрия сельского хозяйства в РФ сталкивается с рядом угроз и одновременно с открывающимися окнами возможностей. Изменившиеся геополитическая и геоэкономическая повестки предопределяют новую институционально-конъюнктурную среду для развития сельскохозяйственного сектора экономики России. При этом вопросы, связанные с поиском ответов

о перспективах агропромышленного комплекса в новых условиях хозяйствования, лежат в плоскости эмпирического анализа данных и моделирования на их основе зарождающихся закономерностей. Насколько внешние ограничения блокируют развитие сельского хозяйства в регионах России, каким образом они определяют возможности развития данного сектора, каковы особенности дальнейших перспектив в данной отрасли – решению данных вопросов и посвящена настоящая статья. Ключевой целью исследования является эмпирическая оценка влияния критического импорта на перспективы развития агропромышленного сектора экономики региона.

Учитывая возрастающую актуальность международных цепочек поставок (МЦП) в системе организации экономических отношений в сфере создания добавленной стоимости на макро- и мезо уровне, их необходимо рассматривать как важнейший

экзогенный фактор при разработке сценарных условий и прогностических моделей устойчивого развития регионально-отраслевых комплексов. В соответствии с этой логикой процесс конструирования моделей должен опираться на эмпирическую оценку влияния сформировавшихся и перспективных цепей поставок товарной номенклатуры на перспективы экономического роста отдельных отраслей на мезоуровне [5, 6, 7].

Увязка внешнеэкономических параметров с перспективами экономического роста имеет давнюю традицию в специальной научной литературе [8, 9]. При этом наибольший уровень популярности приобрели так называемые мультистрановые модели, учитывающие формы торговых связей и генерируемых экспортно-импортных потоков между отдельными государствами. В концентрированной форме в таблице 1 представлен обзор некоторых из них.

Таблица 1 – Основные мультистрановые модели, оценивающие роль экспортно-импортных потоков в системе обеспечения экономического роста

Table 1 – Major multi-country models assessing the role of export-import flows in ensuring economic growth

Модель (методический подход)	Формат анализа межстрановых связей	Тип модели
G-CUBE [10]	Оценка экспортно-импортных потоков в формате международной торговли между двумя юрисдикциями	Dynamic Stochastic General Equilibrium Model (DSGE)
FIDELIO [11]	Оценка экспортно-импортных потоков в формате международной торговли между двумя юрисдикциями	Экономико-математическая модель
E3ME [12], GINFORS [13]	Оценка экспортно-импортных потоков в формате международной торговли между исследуемой юрисдикцией и странами, являющимися ее внешнеторговыми партнерами	Эконометрическая
GTAP [14]	Оценка экспортно-импортных потоков в формате международной торговли между двумя юрисдикциями	CGE-модели (возрастные модели)

Источник: систематизировано авторами
Source: systematized by the authors.

Систематизируя сущность представленных методических подходов, следует отметить некоторые особенности, характеризующие их функционал с позиции исследования содержания и дезагрегации экспортно-импортных потоков, являющихся объектом их исследования. Данный процесс осуществляется в двух формах:

- количественно-стоимостные объемы внешнеторговых потоков без привязки к их товарной структуре;
- исследование на уровне товарных номенклатур внешнеэкономической деятельности (ТНВЭД).

Последний подход является в наибольшей степени эффективным, поскольку он позволяет в более подробном формате исследовать внешнеторговые связи на уровне отдельных товарных номенклатур и стран их

происхождения.

Как показано далее, в нашей модели предлагается альтернативный подход. В соответствии с ним отраслевые модели разрабатываются с учетом оценки и анализа импортируемых товарных потоков, включенных в систему МЦП отрасли, что позволяет лучше интерпретировать экономические процессы с точки зрения зависимости регионально-отраслевых экономических систем от поставляемых из-за рубежа товарных номенклатур.

Масштабируемость исследовательского фокуса до уровня ТНВЭД и учет категории стран (дружественные/недружественные), интегрированных в международные цепи поставок на уровне отраслевых комплексов региона, определяет потенциал исследования регионально-отраслевого экономического

роста с учетом уровня и степени зависимости от сформировавшейся конфигурации импорта на товарно-номенклатурном уровне, а также способствует детальному анализу перспектив отраслевого развития в условиях трансформации внешних связей.

В целом, представленная в настоящем исследовании модель выполняет дополнительную сложную задачу изучения принципов изменений в потенциале изменения объема внешней торговли региона на уровне конкретных товарных номенклатур, учета страны их происхождения для сценарного моделирования их поведения в будущем и прогнозирования с учетом трансформирующихся МЦП перспектив развития исследуемой отрасли.

Условия, материалы и методы. Предметом исследования является взаимосвязь между поставками критически значимой для агропромышленной сферы продукции и макроэкономической динамикой индустрии сельского хозяйства региона в рамках построения прогностических моделей развития в условиях институционально-конъюнктурных изменений. В качестве объекта исследования выступает агропромышленный комплекс Республики Татарстан.

Как и большинство макроэконометрических моделей, разрабатываемая здесь модель опирается на методы регрессионного анализа анализируемых временных рядов. Основными источниками данных являются региональные данные о поставках импорта в разрезе ТНВЭД, публикуемые Федеральной таможенной службой России. Базовая система учета основана на классическом уравнении, оценивающим взаимосвязь между уровнем поставок критической товарной номенклатуры в отрасль и устойчивостью ее развития в целом. Под критическим уровнем ТНВЭД (ТНВЭДкрит.) в настоящем исследовании понимается товарная номенклатура, поставляемая из-за рубежа из стран, классифицируемых в современных условиях как недружественные, доля участия в поставках которых превышает 50% от общего объема отраслевого импорта по рассматриваемому виду товарной номенклатуры. Предполагается, что импортируемая по международным цепям поставок товарная продукция зависит от уровня совокупного спроса на нее, существенные объемы поставок из недружественных стран определяет критический уровень зависимости от данного рода товарной номенклатуры. В этом случае нарушение устоявшихся цепей поставок может привести к инфляции предложения и коррекции производственных процессов в условиях ограниченного объема требующейся продукции конечного и промежуточного потребления.

Модель получает данные о величине критического импорта ТНВЭД (ТНВЭДкрит.) и рассчитывает степень его влияния на перспективы формирования отраслевого прогресса.

Приоритетным уровнем конструирования модели влияния на ключевые макроэкономические параметры отраслевого развития является оценка чувствительности агропромышленного сектора региона к коррекции критического импорта. Это обусловлено содержанием идентифицированного критического импорта, целевое назначение которого направлено на его потребление в сельскохозяйственных видах экономической деятельности.

Учитывая представленную парадигму исследования, в качестве базового уравнения станет:

$$СХотгрузка = \sum_{i=0}^n f(ТНВЭДкрит(i); f_j) \quad (1)$$

где СХотгрузка – объем отгруженных товаров собственного производства, выполнено работ и услуг собственными силами в региональном секторе «Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство» (в стоимостном выражении);

ТНВЭДкрит – товарная номенклатура, поставляемая в отрасль региона по международным цепям поставок (в стоимостном выражении);

f_j – фиктивные переменные, учитывающие неучтенные факторы модели;

n – количество критических видов ТНВЭД.

Подводя промежуточный итог представленным выше подходам, формирующим основу для разработки моделей диагностики и прогнозирования устойчивого развития регионально-отраслевых комплексов в рамках текущих и перспективных траекторий формирования международных цепей поставок, необходимо отметить, что модель характеризуется важными особенностями. Одной из них, является необходимость учета при идентификации отраслевого критического импорта доли недружественных стран, участвующих в его поставках. Данный методический ход формирует новый ракурс исследования влияния сформировавшихся и трансформирующихся во времени импортируемых товарных потоков на макроэкономическую устойчивость регионально-отраслевых систем в условиях внешнеполитических и внешнеэкономических пертурбаций.

В целом, оцениваемая чувствительность региональных макроиндикаторов к сформировавшимся и прогнозируемым международным цепям поставок, модель позволяет на основе проектирования сценариев экономической политики, прогнозировать перспективы отраслевого развития региона в условиях реконфигурации и коррекции формирующихся в рамках МЦП потоков.

В этой системе взаимосвязей исследуемые макроэкономические параметры зависят от товарных потоков, поставляемых по международным цепям поставок в регионально-отраслевые комплексы. Все эти каналы взаимосвязей моделируются, не прибегая к фиксированным пропорциям или

ограничивающим предположениям, а на основе доступных международных и национальных данных с использованием эконометрических методов для прогнозирования поведения региональных экономик и международных торговых потоков.

В качестве статистической базы исследования (экзогенные и эндогенные факторы) определены временные ряды за период с 2010 по 2021 годы. Верхняя граница временного диапазона определена исходя из того, что в условиях происходящих институционально-конъюнктурных преобразований ряд статистических данных, особенно раскрывающих особенности внешнеэкономической деятельности регионов, не публикуется в открытом доступе. В этой связи в исследовании реализуется оценка по данным Федеральной таможенной службы за 2021 год. Данный подход определяет базис для понимания сформировавшихся в период усиленного санкционного давления образца 2022-2025 годы уровня импортоуязвимости, что, в свою очередь, предопределяет степень и глубину рисков, связанных с нарушением устоявшихся ранее внешнеэкономических связей.

Результаты и обсуждение. Несмотря на очевидные позитивные сдвиги в формировании тенденций развития агропромышленного сектора Республики Татарстан, требуется структурный анализ произошедших изменений с целью содержательного анализа развивающихся процессов и построения прогностических моделей. В рамках решения данной задачи, далее представлена попытка комплексного анализа импортозависимости

сельскохозяйственного сектора экономики Республики Татарстан в период до 2022 года и разработка на основе выявленных закономерностей текущих и перспективных сценариев развития агропромышленной отрасли региона.

По данным Татстата, в секторе импорта по направлению ТНВЭД «Продовольственные товары и сельскохозяйственное сырье (кроме текстильного)» в период с 2017 по 2021 годы отмечался заметный прирост в абсолютных значениях поставляемой продукции из стран дальнего зарубежья, относящихся в реалиях сегодняшнего дня к категории недружественных юрисдикций. За рассматриваемый период темпы прироста импорта продукции сельскохозяйственного и продовольственного назначения составили 44,5%.

Особый уровень актуальности вопросов, связанных с импортозамещением в аграрном секторе экономики Республики Татарстан, проявляется на уровне поставок механизированных средств, участвующих в производственных процессах сельскохозяйственной отрасли. Ретроспективный анализ импортоуязвимости агропромышленного сектора экономики Республики Татарстан от рассматриваемой номенклатуры импорта представлен на рисунке 1. Доля данной группы ТНВЭД в общих объемах поставки импорта по направлению «Продовольственные товары и сельскохозяйственное сырье (кроме текстильного)» и параметры изменения данного показателя приведены на рисунке 2.

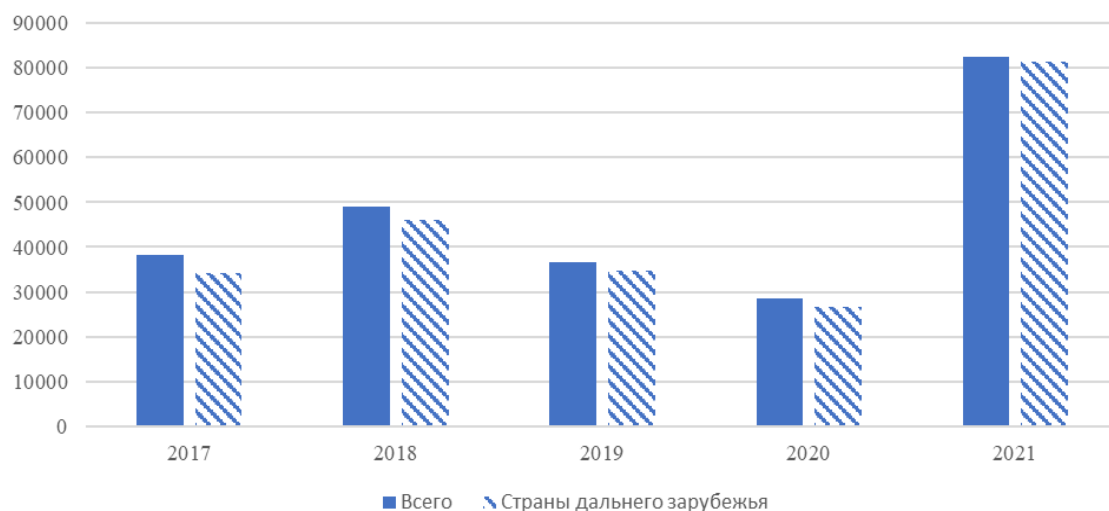


Рис. 1 - Импорт в Республику Татарстан ТНВЭД «Машины или механизмы для уборки или обмолота сельскохозяйственных культур, включая пресс-подборщики, прессы для упаковки в кипы соломы или сена; сенокосилки или газонокосилки; машины для очистки, сортировки или калибровки яиц, плодов», 2015-2021гг., тыс. долл. США

Источник: разработано по данным Федеральной таможенной службы [15]

Fig. 1 — Imports to the Republic of Tatarstan of the HS code “Machines or mechanisms for harvesting or threshing agricultural crops, including balers, straw or hay baling presses; mowers or lawn mowers; machines for cleaning, sorting or grading eggs and fruits”, 2015–2021, thousand USD

Source: developed based on data from the Federal Customs Service [15]

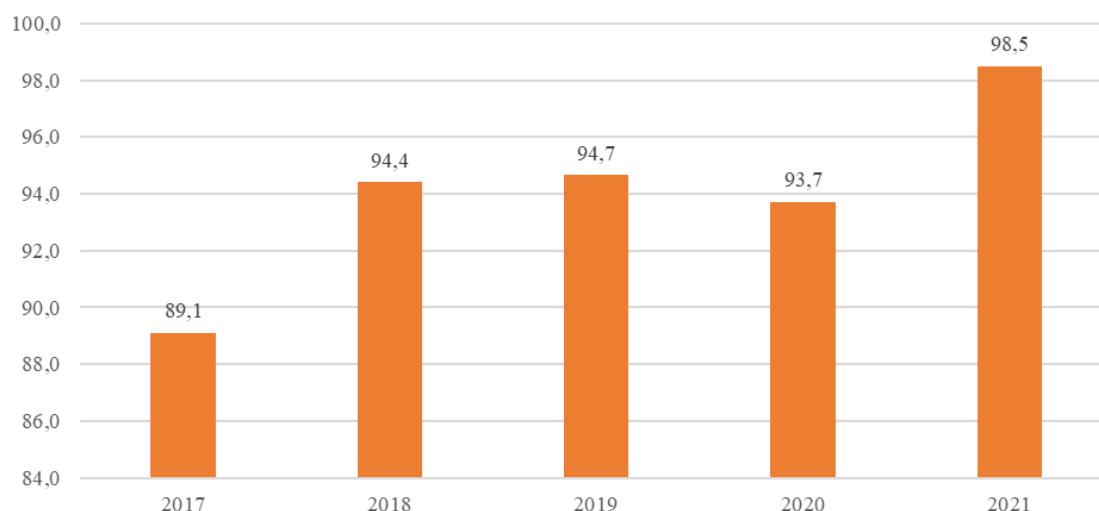


Рис. 2 – Изменение доли товарной номенклатуры «Машины или механизмы для уборки или обмолота сельскохозяйственных культур...», поставляемой из недружественных стран в общем объеме поставки импорта данной группы ТНВЭД, в %

Источник: Федеральная таможенная служба [13]

Fig. 2 — Changes in the share of commodity nomenclature “Machines or mechanisms for harvesting or threshing agricultural crops...”, supplied from unfriendly countries, in the total volume of imports of this HS code group, in %

Source: Federal Customs Service [13]

Полагаясь на полученные оценки критического импорта по рассматриваемой товарной номенклатуре (ТНВД 8433) в сельскохозяйственную отрасль Республики Татарстан, а также полагаясь на рассчитанные доли поставок критически значимой товарной номенклатуры для агропромышленного комплекса региона из недружественных юрисдикций далее представлена апробация

предложенных методических решений.

В качестве инструментальной основы используются конструируемые регрессионные модели, оценивающие уровень влияния рассматриваемого вида товарной номенклатуры на исследуемый сектор экономики региона. Результаты эконометрического моделирования представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные параметры коэффициентов регрессионной модели и их статистической значимости

Table 2 — Estimated parameters of regression model coefficients and their statistical significance

	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение
Y-пересечение	87803,12	4226,16	3,516435	0,046
f1	1,45	0,12	8,95	0,002
ТНВЭДкрит. (8433)	0,386248	0,15	4,409886	0,043

Источник: рассчитано авторами

Source: systematized by the authors

Представленные результаты расчетов демонстрируют состоятельность построенной модели ($R^2 = 0,78$; критерии – значения меньше заданного уровня значимости 0,05). Получено следующее уравнение:

$$CX_{\text{отгрузка}} = 42803,12 + 0,39 \text{ТНВЭДкрит. (8433)} + 1,45f_1 \quad (2)$$

Таким образом, была получена модель, верифицирующая сходимость двух динамических стандартизованных рядов, которая позволяет с высокой степенью достоверности связать динамику реального агропромышленного сектора экономики региона с поставками ТНВЭДкрит., относящихся к категории критического импорта.

Результаты полученных оценок свидетельствуют, что идентифицированная товарная

группа товарной номенклатуры, поставляемая из недружественных стран в агропромышленный сектор экономики Республики Татарстан, относящиеся к категории критического импорта, существенным образом оказывают влияние на развитие сельскохозяйственной отрасли региона.

Представленные результаты конструирования макроэкономических моделей, оценивающих влияние ТНВЭДкрит. (8433) на потенциал прироста объемов отгруженной продукции в аграрной отрасли Республики Татарстан демонстрируют вполне закономерные результаты. Они выражены в том, что коррекция поставок в сельскохозяйственную отрасль критически значимой товарной номенклатуры ТНВЭД 8433 из недружественных стран на

1,0% предопределяет потенциал изменения агрегированного значения индекса Республики Татарстан на 0,39%. Другими словами, прирост импорта ТНВЭД крит. на 10% способствует наращиванию динамики агропромышленного производства на 3,9% (прямая зависимость), и наоборот. Принимая во внимание, что на момент 2022 года объем данной группы критического импорта в регион составлял 81227,0 тыс.долл.США (табл. 3), локализация

его поставок на 10% генерирует риски снижения объемов отгруженных товаров собственного производства по сектору «Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство» до уровня 2372,6 млн. руб. в значениях 2021 года. Сценарный анализ закономерностей, раскрывающих зависимость между исследуемыми параметрами, представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Сценарный анализ закономерностей, раскрывающих зависимость между поставками импорта ТНВЭД 8433 и объемами отгруженной продукции в секторе сельского хозяйства Республики Татарстан, млн. рублей

Table 3 – Scenario analysis of patterns revealing the relationship between imports of HS code 8433 and the volume of shipped products in the agricultural sector of the Republic of Tatarstan, million rubles

	2021	Отклонение от текущего значения 2021 года
Текущее значение	119120,5	
Сценарий 1 (снижение поставок ТНВЭД 8433 на 10%)	116747,9	2372,576
Сценарий 2 (снижение поставок ТНВЭД 8433 на 20%)	113531,8	5588,66
Сценарий 3 (снижение поставок ТНВЭД 8433 на 50%)	103883,5	15236,91

Источник: рассчитано авторами
Source: systematized by the authors

Принимая во внимание, что в условиях усиливающихся ограничений со стороны стран западного блока в сфере поставок импорта, включая и рассматриваемую здесь товарную номенклатуру «Машины или механизмы для уборки или обмолота сельскохозяйственных культур...», разрыв международных цепей генерирует риски формирования поступательных положительных трендов в агропромышленном секторе экономики региона. В этих условиях перспективы развития отрасли во многом должны формироваться в парадигме активизации мер государственной политики по нивелированию зависимости агропромышленного сектора экономики региона от критического импорта. К этим мерам необходимо отнести: смену географии поставок, формирование специальных шлюзов по ввозу критического импорта по каналам параллельного импорта, технологическое развитие и производство отечественных аналогов и др.

Между тем, опираясь на тренды развития сельскохозяйственного сектора экономики Республики Татарстан, характеризующиеся сильным приростом в 2021-2024 годы в размере 50% относительно значений 2021 года, полученные результаты несколько диссонируют с параметрами развития отрасли. Это может свидетельствовать либо о сформировавшихся в регионе альтернативных каналов поставки ТНВЭД крит. (8433), либо о том, что в краткосрочном периоде времени поломка техники не столь масштабна и не несет в себе существенные риски в системе организации производственных процессов. Однако следует учитывать, что в средне- и долгосрочной перспективах, ограничения поставок в агропромышленный сектор экономики критического импорта

будет способствовать наращиванию данных рисков в случае неэффективных мер в сфере импортозамещения.

Выводы. Несмотря на достигнутые высокие результаты к обеспечению автономности агропромышленного комплекса Республики Татарстан, отмечается достаточно сильная зависимость АПК региона от зарубежных комплектующих и техники, обслуживающих сельскохозяйственный сектор. К примеру, по группе ТНВЭД крит. (8433) «Машины или механизмы для уборки или обмолота сельскохозяйственных культур» более 95% продукции поставлялось на момент 2021 года из стран, относящихся сегодня в группе недружественных. Ограничение импорта из данных юрисдикций существенным образом было компенсировано за счет переориентации географии поставок и применения механизмов параллельного импорта. Вместе с тем, учитывая глубину проникновения недружественных стран в международные цепи поставок по данной группе товарной номенклатуры, полное замещение продукции в кратко- и среднесрочной перспективе представляется весьма затруднительной задачей. В этой связи, на фоне динамично развивающегося агропромышленного сектора в Республике Татарстан, продуцирующего, в свою очередь, рост износа техники и комплектующих, приоритетным направлением развития сельскохозяйственного сектора экономики региона является усиление внимания к импортозамещению в сфере машин, механизмов и технологий, применяемых в хозяйственной деятельности агропромышленного комплекса региона. Данный вывод вполне органично согласуется с позицией российских ученых [16, 17, 18].

В заключение необходимо отметить, что

конечно же, импортозависимость агропромышленного сектора региона определяется не только рассмотренной в настоящем исследовании товарной номенклатурой (ТНВЭД 8433). Существуют и другие критические позиции. Разработанный инструментарий позволяет комплексно рассмотреть особенности их влияния на устойчивость сельскохозяйственного сектора экономики региона, сформировать на этой основе объективные представления о степени их воздействия и разработать адаптивные механизмы государственного

управления в сфере адаптации к локализации поставок импорта из недружественных стран.

Сведения о финансировании. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности по проекту № FZSM – 2023 – 0017 «Экономика импортозамещения региона в условиях трансформации логистических цепочек и деглобализации».

Литература

1. Новикова Т. С. Внешнеторговое взаимодействие России и Китая с учетом развития региональной научно-исследовательской инфраструктуры // Экономика региона. 2025. Т.21. №3. С. 686-702. doi: 10.17059/ekon.reg.2025-3-8.
2. Голубев А. В. Агропродовольственное импортозамещение через призму устойчивости сельского хозяйства // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2022. № 8. С. 2-8. doi: 10.31442/0235-2494-2022-0-8-2-8.
3. Ельшин Л. А., Шарапов А. Р., Мингулов А. М. Стратегическая адаптация аграрных регионов к внешним конъюнктурным изменениям // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2025. Т. 20. № 1(77). С. 109-118. doi: 10.12737/2073-0462-2025-1-109-118.
4. Евстафьева А. Х., Боровских О. Н. Оценка развития агропромышленного комплекса России и меры стимулирования его инвестиционной активности // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2023. Т. 18. № 3(71). С. 143-153. doi: 10.12737/2073-0462-2023-143-153.
5. Васильева Р. И., Мариев О. С., Войтенков В. А., Уразбаева А. Р. Факторы экспортной диверсификации: эконометрический анализ промышленных регионов России // Экономика региона. 2022. Т. 18. № 3. С. 895-909. doi: 10.17059/ekon.reg.2022-3-19.
6. Ullrich K. Russia –import substitution during recession. KfW Research Focus on Economics, 2017, vol. 173, pp. 1–3.
7. Гайнутдинов И. Г., Мухаметгалиев Ф. Н., Хисматуллин М. М. [и др.] Роль и значение сельского хозяйства в обеспечении экономической и социальной стабильности общества (на примере Республики Татарстан) // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2024. Т.19. № 3(75). С. 93-104. doi: 10.12737/2073-0462-2024-93-104.
8. Лебедев Н.Д. Развитие российского сельского хозяйства в условиях санкций // Наукосфера. 2022. № 5-1. С. 125–130.
9. Lagravinese R. Economic Crisis and Rising Gaps North-South: Evidence from the Italian Regions // Cambridge Journal of Regions, Economy and Society. 2015. Vol. 8. Issue 2. Pp. 331–342. doi: 10.1093/cjres/rsv006.
10. McKibbin W.J., Wilcoxon P.J. The Theoretical and Empirical Structure of the G-Cubed Model // Economic Modeling. 1999.16.1. pp. 123-148.
11. Kratena K., Streicher G., Temurshoev U., Amores A.F., Arto I., Mongelli I., Neuwha F., Rueda-Cantuche J.M., Andreoni V. FIDELIO 1: Fully Interregional Dynamic Econometric Long-Term Input-Output Model for the EU27 // JRC Scientific and Policy Reports. 2013.25985 EN.
12. Barker T., Junankar S., Pollit H., Summerton P. The Effects of Environmental Tax Reform on International Competitiveness in the European Union: Modeling with E3ME / in M.S. Andersen and P. Ekins (eds) // Carbon Energy Taxation. Lessons from Europe. Oxford University Press. 2009. pp. 147-214.
13. Lutz C., Meyer B., Wolter M.I. The Global Multisector/Multicountry 3-E Model GINFORS. A Description of the Model and a Baseline Forecast for Global Energy Demand and CO2 Emissions // International Journal of Global Environmental Issues. 2010. 10(1). pp. 25-45.
14. Hertel T.W. (Ed.). Global Trade Analysis: Modeling and Applications // Cambridge University Press. Cambridge. 1997.
15. Справочные и аналитические материалы. URL: <https://customs.gov.ru/statistic> (Дата обращения: 15.07.2025).
16. Коваленко Ю. Н. Задачи стратегического управления развитием агропродовольственного комплекса и совершенствованием межсубъектных взаимодействий // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2025. № 6. С. 42-46. doi: 10.31442/0235-2494-2025-0-6-42-46.
17. Мазлоев В. З., Хайруллина О. И. Особенности государственной поддержки сельхозтоваропроизводителей в условиях санкционного давления: угрозы и вызовы // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2024. № 12. С. 2-9. doi: 10.31442/0235-2494-2024-0-12-2-9.
18. Часовских В. П. Об основных составляющих технологического суверенитета России в условиях современных вызовов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2024. № 6. С. 74-82.

References

1. Novikova TS. [Foreign trade interaction between Russia and China Taking into account the development of regional research infrastructure]. Ekonomika regiona. 2025; Vol.21. 3. 686-702 p. doi: 10.17059/ekon.reg.2025-3-8.
2. Golubev AV. [Agri-food import substitution through the prism of agricultural sustainability]. Ekonomika selskokhozyaystvennykh i pererabatyvayushchikh predpriyatiy. 2022; 8. 2-8 p. doi: 10.31442/0235-2494-2022-0-8-2-8.
3. Elshin LA, Sharapov AR, Mingulov AM. [Strategic adaptation of agricultural regions to external market

- changes]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2025; Vol.20. 1(77). 109-118 p. doi: 10.12737/2073-0462-2025-1-109-118.
4. Evstafeva AKh, Borovskikh ON. [Assessment of Russian agro-industrial complex development and measures to stimulate its investment activity]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2023; Vol.18. 3 (71). 143-153 p. doi: 10.12737/2073-0462-2023-143-153.
 5. Vasileva RI, Mariev OS, Voytenkov VA, Urazbaeva AR. [Factors of export diversification: econometric analysis of Russia's industrial regions]. Ekonomika regiona. 2022; Vol.18. 3. 895-909 p. doi: 10.17059/ekon.reg.2022-3-19.
 6. Ullrich K. Russia – import substitution during recession. KfW Research Focus on Economics. 2017; Vol.173. 1-3 p.
 7. Gaynutdinov IG, Mukhametgaliev FN, Khismatullin MM. [The role and importance of agriculture in ensuring economic and social stability of society (on the example of the Republic of Tatarstan)]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2024; Vol.19. 3(75). 93-104 p. doi: 10.12737/2073-0462-2024-93-104.
 8. Lebedev ND. [Development of Russian agriculture in the context of sanctions]. Naukosfera. 2022; 5-1. 125-130 p.
 9. Lagravinense R. Economic crisis and rising gaps North-South: evidence from the Italian regions. Cambridge Journal of Regions, Economy and Society. 2015; Vol.8. Issue 2. 331-342 p. doi: 10.1093/cjres/rsv006.
 10. McKibbin WJ, Wilcoxon PJ. The theoretical and empirical structure of the G-Cubed model. Economic Modelling. 1999; 16.1. 123-148 p.
 11. Kratena K, Streicher G, Temurshoev U, Amores AF, Arto I, Mongelli I, Neuwah F, Rueda-Cantuche JM, Andreoni V. FIDELIO 1: Fully Interregional Dynamic Econometric Long-Term Input-Output Model for the EU27. JRC Scientific and Policy Reports. 2013; 25985 EN.
 12. Barker T, Junankar S, Pollit H, Summerton P. The effects of environmental tax reform on international competitiveness in the European Union: Modeling with E3ME. in M.S. Andersen and P. Ekins (eds). Carbon Energy Taxation. Lessons from Europe. Oxford University Press. 2009; 147-214 p.
 13. Lutz C, Meyer B, Wolter MI. The global multisector/multicountry 3-E model GINFORS. A Description of the model and a baseline forecast for global energy demand and CO2 emissions. International Journal of Global Environmental Issues. 2010; 10(1). 25-45 p.
 14. Hertel TW. (Ed.). Global trade analysis: modeling and applications. Cambridge University Press. Cambridge. 1997.
 15. Reference and analytical materials. [Internet]. Federal Customs Service. [cited 2025, July 15]. Available from: <https://customs.gov.ru/statistic>.
 16. Kovalenko YuN. [Tasks of strategic management of agro-food complex development and improvement of intersubject interactions]. Ekonomika selskokhozyaystvennykh i pererabatyvayushchikh predpriyatiy. 2025; 6. 42-46 p. doi: 10.31442/0235-2494-2025-0-6-42-46.
 17. Mazloev VZ., Khayrullina OI. [Features of state support for agricultural producers under sanctions pressure: threats and challenges]. Ekonomika selskokhozyaystvennykh i pererabatyvayushchikh predpriyatiy. 2024; 12. 2-9 p. doi: 10.31442/0235-2494-2024-0-12-2-9.
 18. Chasovskikh VP. [On the main components of Russia's technological sovereignty in the context of modern challenges]. Kuznechno-shtampovoechnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem. 2024; 6. 74-82 p.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об авторах:

Сафиуллин Марат Рашитович – доктор экономических наук, профессор, проректор по вопросам экономического и стратегического развития Казанского (Приволжского) федерального университета (420008, Российская Федерация, Казань, Кремлёвская улица, 18, корп. 1), вице-президент Академии наук Республики Татарстан, (420111, Российская Федерация, г. Казань, ул. Баумана, д. 20), e-mail: Marat.Safiullin@tatar.ru, ORCID 0009-0009-7770-0711

Шарапов Азат Рафикович – доктор экономических наук, профессор, проректор Поволжского государственного университета физической культуры, спорта и туризма (420010, Российская Федерация, г. Казань, территория Деревня Универсиады, 35), e-mail: info@sportacadem.ru, ORCID 0009-0009-0307-6952

Ельшин Леонид Алексеевич – доктор экономических наук, ведущий научный сотрудник Центра стратегических оценок и прогнозов, заведующий кафедрой мировой и региональной экономики Казанского (Приволжского) федерального университета (420008, Россия, Казань, Кремлёвская улица, 18, корп. 1), директор Центра перспективных экономических исследований Академии наук Республики Татарстан (420111, Российской Федерации, г. Казань, ул. Карла Маркса 23/6, пом. 1004), e-mail: Leonid.Elshin@tatar.ru, ORCID 0000-0002-0763-6453

Абдрахманова Диляра Расимовна – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономики и управления в спорте Поволжского государственного университета физической культуры, спорта и туризма (420010, Российская Федерация, г. Казань, территория Деревня Универсиады, 35), e-mail: diljararasimovna@gmail.com, ORCID 0000-0002-4033-2603

Вклад авторов:

М.Р. Сафиуллин – постановка проблемы, разработка концепции статьи, критический анализ литературы (вклад автора 30%);

А.Р. Шарапов – разработка выводов и описание ключевых результатов (вклад автора 15%);

Л.А. Ельшин – оценка степени чувствительности агропромышленного сектора Республики Татарстан к коррекции критического импорта, используемого в хозяйственной деятельности сельскохозяйственных предприятий региона (вклад автора 15%);

Д.Р. Абдрахманова – разработка и апробация методического подхода к оценке влияния критического импорта на перспективы развития аграрного сектора экономики региона (вклад автора 40%).

Все авторы ознакомились и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила 13.08.2025; одобрена после рецензирования 18.02.2026; принята к публикации 01.04.2026.

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

Authors:

Safiullin Marat Rashitovich – Doctor of Economics, Professor, Vice-Rector for Economic and Strategic Development Kazan (Volga Region) Federal University (18 Kremlyovskaya Street, Building 1, Kazan, 420008, Russian Federation), Vice-President Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan (20 Bauman St., Kazan, 420111, Russian Federation), e-mail: Marat.Safiullin@tatar.ru, ORCID 0009-0009-7770-0711

Sharapov Azat Rafikovich – Doctor of Economics, Professor, Vice-Rector Volga Region State University of Physical Education, Sports and Tourism (35 Universiade Village, Kazan, 420110, Russian Federation), e-mail: info@sportacadem.ru, ORCID 0009-0009-0307-6952

Elshin Leonid Alekseevich – Doctor of Economics, leading researcher at the Center for strategic assessments and forecasts, head of Global and Regional Economy Department Kazan (Volga Region) Federal University (18 Kremlyovskaya Street, Building 1, Kazan, 420008, Russian Federation), Director Center for advanced economic research of Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, (23/6 Karl Marx Street, Room 1004, Kazan, 420111, Russian Federation), e-mail: Leonid.Elshin@tatar.ru, ORCID 0000-0002-0763-6453

Abdrakhmanova Dilyara Rasimovna – Ph.D. of Economic sciences, Associate Professor, Associate Professor of Sports Economics and Management Department Volga Region State University of Physical Education, Sports and Tourism (35 Universiade Village, Kazan, 420110, Russian Federation), e-mail: diliararasimovna@gmail.com, ORCID 0000-0002-4033-2603

Contribution of the authors:

M.R. Safiullin – problem statement, development of the article's concept, critical literature review (author's contribution: 30%);

A.R. Sharapov – formulation of conclusions and description of key results (author's contribution: 15%);

L.A. Elshin – assessment of the sensitivity of the agro-industrial sector of the Republic of Tatarstan to adjustments in critical imports used in the economic activities of regional agricultural enterprises (author's contribution: 15%);

D.R. Abdrakhmanova – development and testing of a methodological approach to assess the impact of critical imports on the development prospects of the region's agricultural sector (author's contribution: 40%).

The authors have reviewed and approved the final manuscript.

Submitted 13.08.2025; revised 18.02.2026; accepted 01.04.2026.



Научный журнал

Вестник Казанского ГАУ

№ 1 (81), май 2026 г.

Редактор – Михайлова Л.В.
Технический редактор – Салахова Г.Р.
Коррекция переводов – Исламова Л.Р.
Корректор – Барсукова Р.С.

ISSN 2073-0462



9 772073 046162 >

Формат 60x84/8. Тираж 500. Дата выхода в свет: 26.05.2026
Печать офсетная. Усл. п. л. 23 Заказ 11. Цена свободная.
Издательство Казанского ГАУ / 420015 г. Казань, ул. К. Маркса, д. 65.
Лицензия на издательскую деятельность код 221 ИД № 06342 от 28.11.2001.
Отпечатано в типографии Казанского ГАУ.
420015 г. Казань, ул. К. Маркса, д. 65.
Казанский государственный аграрный университет