ISSN 2072-9081 (print)
ISSN 2500-1396 (online)

Аграрная наука Евро-Северо-Востока

AGRICULTURAL SCIENCE EURO-NORTH-EAST

Научный журнал
Федерального аграрного
научного центра
Северо-Востока
имени Н. В. Рудницкого

Том 27
№ 2
2026

Vol. 27
No. 2
2026

Аграрная наука Евро-Северо-Востока

Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka

Научный журнал основан в 2000 г. **Том 27, № 2, 2026**

Периодичность 6 раз в год Префикс DOI: 10.30766

© Учредитель журнала – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого»

(ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока) 610007, г. Киров, ул. Ленина, 166а

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Регистрационный номер ПИ №ФС77-72290 от 01.02.2018 г.

Цель журнала – публикация и распространение результатов фундаментальных и прикладных исследований отечественных и зарубежных ученых по научному обеспечению сельского и охотничьего хозяйств при приоритетном освещении проблем рационального природопользования и адаптации агроэкосистем северных территорий к меняющимся климатическим условиям.

Целевая аудитория – научные работники, преподаватели, аспиранты, докторанты, магистранты, специалисты АПК из России, стран СНГ и дальнего зарубежья.

Рубрики журнала:

- ОБЗОРНЫЕ СТАТЬИ
- ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ (Растениеводство. Защита растений. Сельскохозяйственная микробиология и микология. Хранение и переработка сельскохозяйственной продукции. Земледелие, агрохимия, мелиорация. Кормопроизводство: полевое и луговое, кормление сельскохозяйственных животных. Зоотехния. Ветеринарная медицина. Звероводство, охотоведение. Механизация, электрификация, автоматизация. Экономика.)
- ДИСКУССИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
- РЕЦЕНЗИИ
- ХРОНИКА

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

(cc) BY

Главный редактор – Сысуев Василий Алексеевич, д.т.н., профессор, академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, научный руководитель ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров, Россия

Зам. главного редактора – Рубцова Наталья Ефимовна, к.с.-х.н., доцент, зав. научно-организационным отделом ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров, Россия

Ответственные секретари: Соболева Наталия Николаевна, инженер по НТИ научно-организационного отдела ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров, Россия, **Наталья Аркадьевна Гарифуллина** – ученый секретарь научно-организационного отдела ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров, Россия

Редакционный совет

Андреев Николай Руфеевич	д.т.н., чл.-корр. РАН, научный руководитель Всероссийского научно-исследовательского института крахмала и переработки крахмалосодержащего сырья – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А. Г. Лорха», г. Москва, Россия
Багиров Вугар Алиевич	д.б.н., профессор, чл.-корр. РАН, директор Департамента координации деятельности организаций в сфере сельскохозяйственных наук Минобрнауки России, г. Москва, Россия
Баталова Галина Аркадьевна	д.с.-х.н., профессор, академик РАН, зам. директора по селекционной работе, зав. отделом овса ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров, Россия
Гурьянов Александр Михайлович	д.с.-х.н., профессор, главный научный сотрудник Мордовского НИИСХ – филиала ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, г. Саранск, Россия
Дёгтева Светлана Владимировна	д.б.н., чл.-корр. РАН, директор ФИЦ Коми научный центр УрО РАН, г. Сыктывкар, Россия
Джавадов Эдуард Джавадович	д.в.н., заслуженный деятель науки РФ, академик РАН, профессор кафедры эпизоотологии им. В. П. Урбана ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины», г. Санкт-Петербург, Россия
Дидманидзе Отари Назирович	д.т.н., профессор, академик РАН, заслуженный деятель науки РФ, зав. кафедрой тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет –МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва, Россия
Домский Игорь Александрович	д.в.н., профессор, чл.-корр. РАН, директор ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б. М. Житкова», г. Киров, Россия
Еремин Сергей Петрович	д.в.н., профессор кафедры физиологии, биохимии животных и акушерства ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный агротехнологический университет», г. Нижний Новгород, Россия
Иванов Дмитрий Анатольевич	д.с.-х.н., профессор, чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института мелиорированных земель – филиала ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В. В. Докучаева», г. Тверь, Россия
Казакевич Пётр Петрович	д.т.н., профессор, чл.-корр. НАН Беларуси, зам. председателя Президиума НАН Беларуси, иностранный член РАН, г. Минск, Республика Беларусь
Клыков Алексей Григорьевич	д.б.н., профессор РАН, академик РАН, зав. отделом селекции и биотехнологии сельскохозяйственных культур ФГБНУ «Федеральный научный центр агробиотехнологий Дальнего Востока им. А. К. Чайки», г. Уссурийск, Россия
Косолапов Владимир Михайлович	д.с.-х.н., профессор, академик РАН, научный руководитель ФГБНУ «Федеральный научный центр кормопроизводства и агроэкологии имени В. Р. Вильямса», г. Москва, Россия
Костяев Александр Иванович	д.э.н., профессор, академик РАН, главный научный сотрудник, руководитель отдела экономических и социальных проблем развития региональных АПК и сельских территорий Института аграрной экономики и развития сельских территорий – структурного подразделения ФГБУН «Санкт-Петербургский ФИЦ РАН», г. Санкт-Петербург, Россия
Куликов Иван Михайлович	д.э.н., профессор, академик РАН, ФГБНУ «Федеральный научный селекционно-технологический центр садоводства и питомниководства», г. Москва, Россия
Леднев Андрей Викторович	д.с.-х.н., доцент, главный научный сотрудник, руководитель Удмуртского НИИСХ – структурного подразделения ФГБУН «Удмуртский ФИЦ УрО РАН», г. Ижевск, Россия
Никонова Галина Николаевна	д.э.н., профессор, чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник, руководитель отдела прогнозирования трансформации экономических структур и земельных отношений Института аграрной экономики и развития сельских территорий – структурного подразделения ФГБУН «Санкт-Петербургский ФИЦ РАН», г. Санкт-Петербург, Россия
Пашкина Юлия Викторовна	д.в.н., профессор, и.о. зав. кафедрой эпизоотологии, паразитологии и ветеринарно-санитарной экспертизы ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный агротехнологический университет», г. Нижний Новгород, Россия

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук

Журнал включен в базы данных РИНЦ, ВИНИТИ, AGRIS, Russian Science Citation Index (RSCI) на ведущей мировой платформе Web of Science, BASE, Dimensions, Ulrich's Periodicals Directory, DOAJ, EBSCO, Белый список

Полные тексты статей доступны на сайтах электронных научных библиотек: eLIBRARY.RU: http://elibrary.ru; ЭНСХБ: http://www.cnshb.ru/elbib.shtm; CYBERLENINKA: https://cyberleninka.ru; журнала: http://www.agronauka-sv.ru

Оформить подписку можно на сайте "Объединенного каталога "Пресса России" www.pressa-rf.ru по подписному индексу 58391, а также подписаться через интернет-магазин «Пресса по подписке» https://www.akc.ru

Электронная версия журнала: http://www. agronauka-sv.ru

Адрес издателя и редакции:
610007, г. Киров, ул. Ленина, 166а, тел./факс (8332) 33-10-25; тел. (8332) 33-07-21

www. agronauka-sv.ru

E-mail: agronauka-esv@fanc-sv.ru

Техническая редакция, верстка И. В. Кодочигова

Макет обложки Н. Н. Соболева

Фото на обложках А. Широких.

Подписано к печати 24.04.2026
Дата выхода в свет 06.05.2026
Формат 60x84$^{1/8}$.
Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 31,16.
Тираж 100 экз. Заказ 8.
Свободная цена

Отпечатано с оригинал-макета
Адрес типографии:
ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока
610007, г. Киров, ул. Ленина, 166а

Савченко Иван Васильевич — д.б.н., профессор, академик РАН, главный научный сотрудник отдела растительных ресурсов, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений», г. Москва, Россия

Самоделкин Александр Геннадьевич — д.б.н., профессор, руководитель аграрно-экологического направления АНО «Нижегородский научно-образовательный центр», г. Нижний Новгород, Россия

Титова Вера Ивановна — д.с.-х.н., заслуженный деятель науки РФ, профессор, зав. кафедрой агрохимии и агроэкологии ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный агротехнологический университет», г. Нижний Новгород, Россия

Токарев Антон Николаевич — д.в.н., доцент, зав. кафедрой ветеринарно-санитарной экспертизы ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины», г. Санкт-Петербург, Россия

Урбан Эрома Петрович — д.с.-х.н., профессор, чл.-корр. НАН Беларуси, заместитель генерального директора по научной работе РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию», г. Жодино, Республика Беларусь

Широких Ирина Геннадьевна — д.б.н., главный научный сотрудник, зав. лабораторией биотехнологии растений и микроорганизмов ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров, Россия

Щенникова Ирина Николаевна — д.с.-х.н., доцент, чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник, зав. лабораторией селекции и первичного семеноводства ячменя ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров, Россия

Changzhong Ren — Почетный президент Байченской академии сельскохозяйственных наук (КНР), иностранный член РАН, г. Байчен, Китай

Ivanovs Semjons — д.т.н., Латвийский университет естественных наук и технологий, г. Елгава, Латвия

Marczuk Andrzej — д.т.н., профессор, декан факультета Люблинского природоведческого университета, г. Люблин, Польша

Náhlik András — профессор, ректор, Университет Шопрона, Институт охраны дикой природы и зоологии позвоночных, г. Шопрон, Венгрия

Poutanen Kaisa — профессор VTT технического исследовательского центра Финляндии, г. Эспоо, Финляндия

Romaniuk Wazlaw — д.т.н., профессор, Технолого-природоведческий институт, г. Варшава, Польша

Yu Li — профессор, научный руководитель Цзилинского аграрного университета, иностранный член РАН, член инженерной академии наук Китая, г. Чанчунь, Китай

Редакционная коллегия

Алешкин Алексей Владимирович — д.т.н., профессор, профессор кафедры механики и инженерной графики ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров, Россия

Артемьев Андрей Александрович — д.с.-х.н., доцент, ведущий научный сотрудник, директор Мордовского НИИСХ – филиала ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, г. Саранск, Россия

Брандорф Анна Зиновьевна — д.с.-х.н., ведущий научный сотрудник, зав. лабораторией пчеловодства ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров, Россия

Бурков Александр Иванович — д.т.н., профессор, заслуженный изобретатель РФ, главный научный сотрудник лаборатории зерно- и семяочистительных машин ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров, Россия

Егошина Татьяна Леонидовна — д.б.н., профессор, зав. отделом экологии и ресурсоведения ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б. М. Житкова», г. Киров, Россия

Ивановский Александр Александрович — д.в.н., ведущий научный сотрудник, зав. лабораторией ветеринарной биотехнологии ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров, Россия

Костенко Ольга Владимировна — к.э.н., доцент, доцент кафедры бухгалтерского учета и финансов ФГБОУ ВО «Вятский государственный агротехнологический университет», г. Киров, Россия

Парлюк Екатерина Петровна — д.т.н., профессор кафедры «Колесные машины» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана», г. Москва, Россия

Рябова Ольга Вениаминовна — к.б.н., доцент кафедры микробиологии ФГБОУ ВО «Пермская государственная фармацевтическая академия», г. Пермь, Россия

Савельев Александр Павлович — д.б.н., главный научный сотрудник отдела экологии животных ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б. М. Житкова», г. Киров, Россия

Товстик Евгения Владимировна — к.б.н., доцент, доцент кафедры фундаментальной химии и методики обучения химии, старший научный сотрудник Центра компетенций «Экологические технологии и системы» ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров, Россия

Филатов Андрей Викторович — д.в.н., профессор кафедры зоогигиены, физиологии и биохимии ФГБОУ ВО «Вятский государственный агротехнологический университет», г. Киров, Россия

Шешегова Татьяна Кузьмовна — д.б.н., старший научный сотрудник, зав. лабораторией иммунитета и защиты растений ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, г. Киров, Россия

Юнусов Губейдулла Сибяттулович — д.т.н., профессор кафедры механизации производства и переработки с.-х. продукции Аграрно-технологического института ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет», г. Йошкар-Ола, Россия

Agricultural Science Euro-North-East, 2026;27(2)
Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka
Peer-reviewed scientific journal was established in 2000
The journal is published six times per year. DOI: 10.30766

© **The founder of the journal is Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky,** 610007, Kirov, Lenin str., 166a

The publication is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media

Registration number
PI №FS 77-72290 01 Feb 2018

Aim of the Journal – publication and distribution of results of fundamental and applied researches conducted by native and foreign scientists for scientific support of agricultural and hunting sectors, with focus on the problems of rational use of natural resources and adaptation of agroecosystems of northern territories to changing climatic conditions.

Target audience – scientists, university professors, graduate students, postdoctoral, masters, specialists of agro- industrial complex from Russia, countries of CIS and far-abroad countries.

Headings

- REVIEWS
- ORIGINAL SCIENTIFIC ARTICLES

  (Plant Growing. Plant protection. Agricultural Microbiology and Mycology. Storage and Processing of Agricultural Production. Agriculture, Agrochemistry, Land Improvement. Fodder Production: Field and Meadow; Livestock Feeding. Zootechny. Veterinary Medicine. Fur Farming and Hunting. Mechanization, Electrification, Automation. Economy)
- DISCUSSION PAPERS
- PEER-REVIEWS
- CHRONICLE

All the materials of the «Agricultural Science Euro-North-East» journal are available under Creative Commons Attribution 4.0 License

(cc) BY

Editor-in-chief – Vasily A. Sysuev, Dr. of Sci. (Engineering), the professor, academician of RAS, Honored Worker of Science of the Russian Federation, academic advisor of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Kirov, Russia

Deputy editor-in-chief – Natalya E. Rubtsova, Cand. of Sci. (Agricultural), associate professor, Head of the Science and Organization Department, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Kirov, Russia

The responsible secretaries: Natalia N. Soboleva, engineer of scientific and technical information, the Science and Organization Department, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Kirov, Russia,
Natalia A. Garifullina, scientific Secretary, the Scientific and Organization Department, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Kirov, Russia

Editorial council

Nikolay R. Andreev	Dr. of Sci. (Engineering), corresponding member of RAS, Academic advisor of the All-Russian Research Institute of Starch and Processing of Starch-Containing Raw Materials – Branch of Russian Potato Research Centre, Moscow, Russia
Vugar A. Bagirov	Dr. of Sci. (Biology), professor, corresponding member of RAS, Director of the Department of Coordination of Organizations in the Field of Agricultural Sciences of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Moscow, Russia
Galina A. Batalova	Dr. of Sci. (Agricultural), the professor, academician of RAS, the deputy Director on selection work, the head of Department of oats of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Kirov, Russia
Alexander M. Guryanov	Dr. of Sci. (Agricultural), professor, chief researcher of the Mordovia Agricultural Research Institute – Branch of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Saransk, Russia
Svetlana V. Degteva	Dr. of Sci. (Biology), corresponding member of RAS, the Director of the Federal Research Center Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russia
Eduard D. Dzhavadov	Dr. of Sci. (Veterinary), Honored Worker of Science of the Russian Federation, academician of RAS, professor at the Department of Epizootology named after V.P. Urban, Saint-Petersburg State University of Veterinary Medicine, St. Petersburg, Russia
Otari N. Didmanidze	Dr. of Sci. (Engineering), professor, academician of RAS, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Acting Head of the Department of Tractors and Automobiles, Russian Timiryazev State Agrarian University, Moscow, Russia
Igor A. Domskiy	Dr. of Sci. (Veterinary), professor, corresponding member of RAS, Director at Professor Zhitkov Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming, Kirov, Russia
Sergey P. Eremin	Dr. of Sci. (Veterinary), professor at the Department of Physiology, Animal Biochemistry and Obstetrics, Breeding of Farm Animals and Obstetrics of Nighny Novgorod State Agrotechnological University, Nizhny Novgorod, Russia
Dmitriy A. Ivanov	Dr. of Sci. (Agricultural), professor, corresponding member of RAS, chief researcher of the All-Russian Institute of Reclaimed Lands – Branch of the Federal Research Centre V. V. Dokuchaev Soil Science Institute, Tver, Russia
Petr P. Kazakevich	Dr. of Sci. (Engineering), the professor, corresponding member of Belarus NAS, Deputy Chairman of Presidium of Belarus NAS, a foreign member of RAS, Minsk, Republic of Belarus
Aleksey G. Klykov	Dr. of Sci. (Biology), Professor of RAS, Academician of RAS, Head of the Department of Breeding and Biotechnology of Agricultural Crops, Federal Scientific Center of Agricultural Biotechnology of the Far East named after A.K. Chaika, Ussuriysk, Russia
Vladimir M. Kosolapov	Dr. of Sci. (Agricultural), the professor, academician of RAS, the Academic advisor of the Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecologi, Moscow, Russia
Aleksandr I. Kostjaev	Dr. of Sci. (Economics), professor, academician of RAS, chief researcher, Chief of the Department of Economic and Social Problems of the Development of Regional Agro-Industrial Complex and Rural Territories the Institute of Agricultural Economics and Rural Development, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia
Ivan M. Kulikov	Dr. of Sci. (Economics) professor, academician of RAS, Federal Horticultural Center for Breeding, Agrotechnology and Nursery, Moscow, Russia
Andrei V. Lednev	Dr. of Sci. (Agricultural), associate professor, head of Udmurt Research Institute of Agriculture – Branch of the Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk, Russia
Galina N. Nikonova	Dr. of Sci. (Economics), professor, corresponding member of RAS, chief researcher, Chief of the Department of Forecasting Changes in Economic Structures and Land Relations of the Institute of Agricultural Economics and Rural Development, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia
Yulia V. Pashkina	Dr. of Sci. (Veterinary), professor, the acting head at the Department of Epizootology, Parasitology and Veterinary-Sanitary Inspection of Nighny Novgorod State Agrotechnological University, Nizhny Novgorod, Russia

The Journal is included in the List of peer-reviewed scientific publications, where research results from «Candidate of Science» and «Doctor of Science» academic degree dissertations have to be published

The journal is included into Russian Index of Science Citation (RINC), AGRIS, Russian Science Citation Index (RSCI) on the world's leading platform Web of Science, BASE, Dimensions, Ulrich's Periodicals Directory, DOAJ, EBSCO, Whitelist

The full texts of articles are available on the websites of the following journals and scientific electronic libraries: eLIBRARY.RU, Electronic Scientific Agricultural Library, CYBERLENINKA, Google Scholar

The journal is included into Russian Index of Science Citation (RINC), Abstract journal and databases of All-Russian Institute of Scientific and Technical Information

One can subscribe for the print edition of the journal «Agricultural Science Euro-North-East» at the site of the Union catalogue «Press of Russia» www.pressa-rf.ru by the index 58391 or via the Internet shop «Pressa po Podpiske (Press by subscription)» https://www.akc.ru

Electronic version of the journal: http://www. agronauka-sv.ru

Publisher and editorial address:
610007, Kirov, Lenin str., 166a,
tel./fax (8332) 33-10-25;
tel. (8332) 33-07-21

www. agronauka-sv.ru

E-mail: agronauka-esv@fanc-sv.ru

Technical edition, layout
Irina V. Kodochigova

Cover layout
Natalia N. Soboleva

Photos on the covers
A. Shirokikh.

Passed for printing
24.04.2026
Date of publication
06.05.2026
Format 60x84$^{1/8}$. Offset paper.
Cond. pecs. l. 31.16.
Circulation 100 copies. Order 8.
Free price.

Address of the printing house:
FGBNU FARC North-East. 610007,
Kirov, Lenin str., 166a

Ivan V. Savchenko — Dr. of Sci. (Biology), the professor, academician of RAS, chief researcher All-Russian Scientific Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants, Moscow, Russia

Alexander G. Samodelkin — Dr. of Sci. (Biology), professor, Head of the agricultural and Environmental direction of the Nizhny Novgorod Scientific and Educational Center, Nizhny Novgorod, Russia

Vera I. Titova — Dr. of Sci. (Agricultural), Honored Worker of Science of the Russian Federation, professor, Head of the Department of Agrochemistry and Agroecology of Nighny Novgorod State Agrotechnological University, Nizhny Novgorod, Russia

Anton N. Tokarev — Dr. of Sci. (Veterinary), associate professor, Head of the Department of Veterinary-Sanitary Inspection Saint-Petersburg State Academy of Veterinary Medicine, St. Petersburg, Russia

Eroma P. Urban — Dr. of Sci. (Agricultural), professor, corresponding member of Belarus NAS, Deputy General Director for Research, Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Arable Farming, Zhodino, Republic of Belarus

Irina G. Shirokikh — Dr. of Sci. (Biology), chief researcher, Head of the Laboratory of Biotechnology of Plants and Microorganisms of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Kirov, Russia

Irina N. Shchennikova — Dr. of Sci. (Agricultural), associate professor, corresponding member of RAS, chief researcher, Head of the Laboratory of Selection and Primary Seed Breeding of Barley of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Kirov, Russia

Changzhong Ren — Honorary President of the Baicheng Academy of Agricultural Sciences (China), a foreign member of RAS, Baicheng, China

Semjons Ivanovs — Dr. of Sci. (Engineering), Latvia University of Life Sciences and Technologies, Jelgava, Latvia

Andrzej Marczuk — Dr. of Sci. (Engineering), professor, dean, University of Life Sciences in Lublin, Lublin, Poland

András Náhlik — The professor, rector, University of Sopron, Institute of Wildlife Management and Vertebrate Zoology, Sopron, Hungary

Kaisa Poutanen — Dr. of Sci. (Engineering), Academy Professor, VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland

Vaclav Romaniuk — Dr. of Sci. (Engineering), professor, Institute of Technology and Life Sciences, Falenty, Poland

Li Yu — professor, chief scientific officer, Jilin Agricultural University, foreign member of RAS, member of the Chinese Academy of Sciences, Changchun, China

Editorial Board

Aleksey V. Aleshkin — Dr. of Sci. (Engineering), professor, the Department of Mechanics and Engineering Drawing, Vyatka State University, Kirov, Russia

Andrey A. Artemjev — Dr. of Sci. (Agricultural), associate professor, leading researcher, Director of Mordovia Agricultural Research Institute –Branch of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Saransk, Russia

Anna S. Brandorf — Dr. of Sci. (Agricultural), leading researcher, head of the Laboratory of Beekeeping, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Kirov, Russia

Alexander I. Burkov — Dr. of Sci. (Engineering), professor, chief researcher of the Laboratory of Grain- and Seed-Cleaning Machines, the Honored Inventor of the Russian Federation, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Kirov, Russia

Tatyana L. Egoshina — Dr. of Sci. (Biology), professor, Head of the Department of Ecology and Resource Management, Professor Zhitkov Federal State Budgetary Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming, Kirov, Russia

Alexander A. Ivanovsky — Dr. of Sci. (Veterinary), leading researcher, head of the Laboratory of Veterinary Biotechnology, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Kirov, Russia

Olga V. Kostenko — Cand. of Sci. (Economics), associate professor, associate professor at the Department of Accounting and Finance, Vyatka State Agrotechnological University, Kirov, Russia

Ekaterina P. Parlyuk — Dr. of Sci. (Engineering), professor at the Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Olga V. Ryabova — Cand. of Sci. (Biology), associate professor at the Department of Microbiology, Perm State Pharmaceutical Academy, Perm, Russia

Alexander P. Saveljev — Dr. of Sci. (Biology), chief researcher, the Department of Animal Ecology, Professor Zhitkov Federal State Budgetary Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming, Kirov, Russia

Evgeniya V. Tovstik — Cand. Sci. (Biology), associate professor at the Department of Basic Chemistry and Chemistry Training Methodology, senior researcher at the Center of Competence and Environmental Technologies and Systems, Vyatka State University, Kirov, Russia

Andrey V. Filatov — Dr. of Sci. (Veterinary), professor, the Department of Zoological Hygiene, Physiology and Biochemistry, Vyatka State Agrotechnological University, Kirov, Russia

Tatyana K. Sheshegova — Dr. of Sci. (Biology), senior researcher, head of the Laboratory of Immunity and Plants Protection, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Kirov, Russia

Gubeidulla S. Junusov — Dr. of Sci. (Engineering), professor, Institute of Agricultural Technologies of Mari State University, Yoshkar-Ola, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЗОРНЫЕ СТАТЬИ

О. В. Чубукова, Л. Р. Хакимова, З. Р. Вершинина, Е. В. Михайлова, А. С. Карунас, Э. К. Хуснутдинова, О. А. Гусев
Биобанки генетических ресурсов сельскохозяйственных животных в мире и России (обзор)…… 257

Е. А. Сизова, К. С. Нечитайло, К. В. Рязанцева, Д. Е. Шошин, Т. А. Семынин, А. С. Бардакова
Характеристика генов и их экспрессия, ассоциированная с ростовыми показателями цыплят-бройлеров под действием различных кормовых добавок (обзор) …… 272

В. Н. Домацкий, Л. А. Глазунова, Ю. В. Глазунов
Использование материалов природного происхождения против паразитических насекомых и клещей (обзор)…… 289

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

РАСТЕНИЕВОДСТВО

О. В. Ткаченко, Н. В. Рязанцев, А. А. Беляева, Е. Е. Костина
Влияние продолжительности яровизации *in vitro* на рост и продуктивность озимых злаков в условиях фитотронно-тепличного комплекса..…….. 308

А. В. Бакулина, Е. А. Бессолицына, О. Н. Шуплецова, Л. С. Савинцева
Результаты генотипической и фенотипической оценки сортов ячменя по устойчивости к алюминию…….. 319

В. В. Бычкова, О. П. Кибальник, И. А. Сазонова
Оценка влияния цитоплазматического эффекта на биохимический состав зерна линий сорго…… 331

М. Е. Мухордова, А. И. Черемисин, С. В. Согуляк, М. В. Урман
Результаты корреляционного и путевого анализов для выявления селекционно-ценных признаков картофеля, влияющих на урожайность…….. 340

ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

А. Н. Князев, О. В. Разумова, Л. Н. Ефремова, Ю. Н. Смотрова, П. Н. Харченко
Идентификация и экспериментальное подтверждение кольцевой РНК, ассоциированной с генами деметилаз у кукурузы…… 350

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ МИКРОБИОЛОГИЯ И МИКОЛОГИЯ

Г. П. Кононенко, А. А. Буркин, Е. В. Зотова, Е. А. Пирязева
Микотоксикологический анализ сорго-суданкового гибрида BMR-типа в ходе вегетации…… 359

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ, АГРОХИМИЯ, МЕЛИОРАЦИЯ

А. Г. Куклина, А. Н. Швецов
Видовой состав сегетальной растительности в агрофитоценозах юго-востока Московской области…… 368

Н. М. Казнина, Е. С. Холопцева, Ю. В. Батова
Семенная продуктивность и качество семян двух сортов горчицы сарептской при разных концентрациях цинка в корнеобитаемой среде…… 380

КОРМОПРОИЗВОДСТВО: ПОЛЕВОЕ И ЛУГОВОЕ

Е. П. Шкодина, О. В. Балун
Оценка влияния метеорологических факторов на рост, развитие и урожайность гибрида сорго сахарного Силосное 88 в условиях Новгородской области…….. 390

КОРМОПРОИЗВОДСТВО: КОРМЛЕНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ

Р. Т. Тимакова, С. Ю. Ефремова
Возможности оперативного выявления фальсификата на рынке кормовых аминокислот…… 401

ЗООТЕХНИЯ

К. Д. Чаицкая, А. А. Чаицкий, П. О. Щеголев, А. А. Королев, В. А. Дуркина
Роль полиморфизма гена *IGF1* в предрасположенности коров к кетозу…… 411

Н. А. Худякова, И. С. Кожевникова, А. О. Ступина, И. А. Классен, А. С. Кашин
Ассоциация полиморфизма гена *MBL1* с показателями молочной продуктивности у коров холмогорской породы…….. 425

А. Ю. Криворучко, Л. Н. Скорых, О. Н. Криворучко, А. А. Каниболоцкая, О. А. Яцык, Л. В. Кононова, Е. Ю. Сафарян
Поиск полиморфизмов гена *FRY*, связанных с параметрами живой массы у баранов породы манычский меринос…….. 435

ВЕТЕРИНАРНАЯ МЕДИЦИНА

И. М. Петрова, М. В. Бытов, С. Л. Хацко, Л. И. Дроздова, И. А. Шкуратова
Патоморфологические особенности изменений миокарда у поросят при промышленном содержании…… 448

М. П. Неустроев, Е. И. Эльбядова
Результаты разработки вакцины против мыта лошадей для России и Монголии…….. 457

ЗВЕРОВОДСТВО. ОХОТОВЕДЕНИЕ

Б. Е. Зарубин, В. В. Колесников, А. В. Экономов, А. В. Козлова, В. В. Степанов, М. А. Перевозчикова, А. Ю. Просеков, Е. А. Вечтомова, В. Н. Пиминов, Д. П. Стрельников
Ресурсы рябчика и их использование в Кировской области: история и современность…… 467

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ

А. И. Кутырёв, Р. А. Филиппов
Применение компьютерного зрения и глубокого обучения для автоматизированного мониторинга роста растений земляники садовой…… 480

С. А. Ракутько, Е. Н. Ракутько
Применение искусственной нейронной сети при моделировании распределения освещенности в трехмерном пространстве 493

О. Н. Дидманидзе, Е. П. Парлюк, А. И. Новиченко
Формирование рациональных структур технологических систем в природообустройстве с помощью агентного имитационного моделирования…… 504

CONTENTS

REVIEWS

Olga V. Chubukova, Liliya R. Khakimova, Zilya R.Vershinina, Elena V. Mikhailova, Alexandra S. Karunas, Elsa K. Khusnutdinova, Oleg A. Gusev
Biobanks of genetic resources of farm animals worldwide and in Russia (review) …… 257

Elena A. Sizova, Ksenia S. Nechitailo, Kristina V. Ryazantseva, Daniil E. Shoshin, Timofey A. Semynin, Alexandra S. Bardakova
Characteristics of genes and their expression associated with the growth rates of broiler chickens under the influence of various feed additives (review) …… 272

Vladimir N. Domatsky, Larisa A. Glazunova, Yuri V. Glazunov
The use of natural materials against parasitic insects and ticks (review) …… 289

ORIGINAL SCIENTIFIC ARTICLES

PLANT GROWING

Oksana V. Tkachenko, Nikita V. Ryazantsev, Anna A. Belyaeva, Ekaterina E. Kostina
The effect of *in vitro* vernalization duration on the growth and productivity of winter cereals in a phytotron-greenhouse complex…….. 308

Anna V. Bakulina, Ekaterina A. Bessolitsyna, Olga N. Shupletsova, Larisa S. Savintseva
Results of genotypic and phenotypic evaluation of barley cultivars for aluminum tolerance …….. 319

Vera V. Bychkova, Oksana P. Kibalnik, Irina A. Sazonova
Assessment of the influence of cytoplasmic effect on the biochemical composition of sorghum grain lines…… 331

Maria E. Mukhordova, Alexander I. Cheremisin, Sergey V. Sogulyak, Maksim V. Urman
Results of correlation and path analyses for identifying breeding-valuable traits in potato affecting yield…… 340

PLANT PROTECTION

Andrey N. Knyazev, Olga V. Razumova, Larisa N. Efremova, Yuliya N. Smotrova, Petr N. Kharchenko
Identification and experimental validation of a circular RNA associated with demethylase genes in maize…….. 350

AGRICULTURAL MICROBIOLOGY AND MYCOLOGY

Galina P. Kononenko, Aleksey A. Burkin, Elena V. Zotova, Elena A. Piryazeva
Mycotoxicological analysis of the BMR-type sorghum-sudangrass hybrid during vegetation…… 359

AGRICULTURE, AGROCHEMISTRY, LAND IMPROVEMENT

Alla G. Kuklina, Alexander N. Shvetsov
Species composition of segetal vegetation in agrophytocenoses in the south-east of Moscow region…… 368

Natalia M. Kaznina, Ekaterina S. Kholoptseva, Yulia V. Batova
Seed productivity and seed quality of two Sarepta mustard cultivars under different zinc concentrations in the root environment…….. 380

FODDER PRODUCTION: FIELD AND MEADOW

Elena P. Shkodina, Olga V. Balun
Assessment of the influence of meteorological factors on the growth, development and yield of the ‘Silosnoe 88’ sweet sorghum hybrid in the Novgorod region…… 390

FODDER PRODUCTION: LIVESTOCK FEEDING

Roza T. Timakova, Sania Yu. Efremova
Opportunities for prompt detection of adulterated products in the feed amino acid market…… 401

ZOOTECHNY

Kseniya D. Chaitskaya, Alexey A. Chaitskiy, Pavel O. Schiogolev, Anton A. Korolev, Viktoriya A. Durkina
The role of IGF1 gene polymorphism in predisposition of cows to ketosis…… 411

Natalia A. Khudyakova, Irina S. Kozhevnikova, Alexandra O. Stupina, Inga A. Klassen, Andrey S. Kashin
Association of *MBL1* gene polymorphism with milk productivity in Kholmogory breed cows…….. 425

Alexander Yu. Krivoruchko, Larisa N. Skorykh, Olga N. Krivoruchko, Anastasia A. Kanibolotskaya, Olesya A. Yatsyk, Lidia V. Kononova, Elena Yu. Safaryan
Search for polymorphisms of the *FRY* gene associated with live weight parameters in Manych Merino rams…….. 435

VETERINARY MEDICINE

Irina M. Petrova, Maksim V. Bytov, Sergey L. Khatsko, Lyudmila I. Drozdova, Irina A. Shkuratova
Pathomorphological features of myocardial changes in piglets under industrial housing conditions…….. 448

Mikhail P. Neustroev, Evdokia I. Elbyadova
Results of the development of a vaccine against strangles in horses for Russia and Mongolia…….. 457

FUR FARMING AND HUNTING

Boris E. Zarubin, Vyacheslav V. Kolesnikov, Aleksandr V. Ekonomov, Anna V. Kozlova, Valery V. Stepanov, Maria A. Perevozchikova, Aleksandr Yu. Prosekov, Elena A. Vechtomova, Vladimir N. Piminov, Dmitriy P. Strelnikov
Status and use of hazel grouse resources in the Kirov region, Russia: history and modernity…… 467

MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

Alexey I. Kutyrev, Rostislav A. Filippov
Application of computer vision and deep learning for automated monitoring of garden strawberry plant growth…… 480

Sergei A. Rakutko, Elena N. Rakutko
Application of artificial neural network in modeling illumination distribution in three-dimensional space…… 493

Otari N. Didmanidze, Ekaterina P. Parlyuk, Anton I. Novichenko
Formation of rational structures of technological systems in environmental management using agent-based simulation modeling……. 504

ОБЗОРЫ/REVIEWS

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.257–271
УДК 636.082.

(cc) BY

Биобанки генетических ресурсов сельскохозяйственных животных в мире и России (обзор)

© 2026. О. В. Чубукова✉, Л. Р. Хакимова, З. Р. Вершинина, Е. В. Михайлова, А. С. Карунас, Э. К. Хуснутдинова, О. А. Гусев
Институт биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение ФГБНУ Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, г. Уфа, Российская Федерация

Сокращение биоразнообразия и как следствие генетических ресурсов сельскохозяйственных животных во всем мире в результате растущего антропогенного воздействия признано глобальной проблемой, требующей немедленного решения. Поэтому важнейшее значение приобретает деятельность по сохранению национальных генофондов сельскохозяйственных животных. Одной из наиболее эффективных форм сохранения генетических ресурсов является долгосрочное депонирование биоматериалов животных в специализированных коллекциях-биобанках. Мировой опыт показывает, что создание подобных биобанков, материалы которых будут доступны ученым, селекционерам и представителям сельского хозяйства, имеет большое научное и прикладное значение. В статье проанализированы отечественные и зарубежные источники за последние 10 лет. Цель обзора – обобщение актуальных данных по развитию биобанкирования сельскохозяйственных животных в мире и Российской Федерации. Рассмотрены современное состояние проблемы сохранения генетических ресурсов сельскохозяйственных животных и подходы для ее решения, основной акцент сделан на сохранении материалов in vitro. В работе описывается текущее состояние коллекций генетических ресурсов сельскохозяйственных животных в РФ и крупнейших национальных генных банках ряда стран. Показана необходимость расширения работы в области биобанкирования сельскохозяйственных животных. В дальнейшем, образцы биобанков могут быть использованы как для сохранения популяций малочисленных, редких пород животных, так и восстановления генетической изменчивости коммерческих, активно разводимых пород. С развитием омиксных технологий биобанки сельскохозяйственных животных приобретают особое значение как источники генетически разнообразной и специализированной ДНК, которая может быть использована для исследования функций генов, анализа геномных ассоциаций.

Ключевые слова: *генофонд, порода, генный банк, биологические коллекции, криоконсервация, ex situ сохранение, биоматериалы*

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке мегагранта Минобрнауки РФ «Разработка эффективных инструментов для развития животноводства с использованием генетических технологий и анализа больших данных» (№ 075-15-2025-014 (№ 075-15-2024-666), 2024–2028 гг.) https://labgentech.ru/megagrant/megagrant-075-15-2025-014/

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

***Конфликт интересов*:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Чубукова О. В., Хакимова Л. Р., Вершинина З. Р., Михайлова Е. В., Карунас А. С., Хуснутдинова Э. К., Гусев О. А. Биобанки генетических ресурсов сельскохозяйственных животных в мире и России (обзор). Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):257–271. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.257-271

Поступила в редакцию: 08.07.2025
Доработана после рецензирования: 20.08.2025
Принята к публикации: 23.03.2026
Опубликована онлайн: 27.04.2026

Biobanks of genetic resources of farm animals worldwide and in Russia (review)

© 2026. Olga V. Chubukova✉, Liliya R. Khakimova, Zilya R.Vershinina, Elena V. Mikhailova, Alexandra S. Karunas, Elsa K. Khusnutdinova, Oleg A. Gusev
Institute of Biochemistry and Genetics – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation

The decline in biodiversity and, as a consequence, in genetic resources of farm animals worldwide as a result of the growing anthropogenic impact is recognized as a global problem that requires an immediate solution. Therefore, the conservation of national gene pools of farm animals is of crucial importance. One of the most effective forms of conservation of genetic resources is the long-term deposit of animal biomaterials in specialized collections-biobanks. Global experience shows that the creation of such biobanks with materials accessible to scientists, breeders, and agricultural professionals, is of great scientific and applied importance. The article analyzes domestic and foreign sources over the last 10 years. The purpose of

the review is to summarize current data on the development of biobanking of farm animals worldwide and in the Russian Federation. The current state of the problem of conservation of genetic resources of farm animals and approaches for its solution are considered, the main emphasis is on the conservation of materials in vitro. The paper describes the current state of collections of genetic resources of farm animals in the Russian Federation and the largest national gene banks in several countries. The need to expand work in the field of biobanking of farm animals is shown. In the future, biobank samples can be used both to preserve populations of small, rare animal breeds and to restore the genetic variability of commercial, actively bred breeds. With the development of omix technologies, biobanks of farm animals are becoming particularly important as sources of genetically diverse and specialized DNA that can be used to study gene functions and analyze genomic associations.

Keywords: *gene pool, breed, gene bank, biological collections, cryopreservation, ex situ conservation, biomaterials*

Acknowledgements*:* the research was funded by megagrant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation «Development of effective tools for livestock farming growth using genetic technologies and big data analysis» (No. 075-15-2025-014 (previously No. 075-15-2024-666), 2024-2028). https://labgentech.ru/megagrant/megagrant-075-15-2025-014/

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Chubukova O. V., Khakimova L. R., Vershinina Z. R., Mikhailova E. V., Karunas A. S., Khusnutdinova E. K., Gusev O. A. Biobanks of genetic resources of farm animals worldwide and in Russia (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):257–271. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.257-271

Received: 08.07.2025
Revised: 20.08.2025
Accepted for publication: 23.03.2026
Published online: 27.04.2026

За последнее десятилетие стало понятно, что биобанки являются ценнейшим ресурсом для различных прикладных и фундаментальных исследований во многих биологических науках, в сфере здравоохранения, сельского хозяйства [1, 2]. В научной литературе существуют различные определения понятия «биобанк», однако, в целом под данным термином понимают коллекцию детально охарактеризованных качественных биологических образцов различного типа, предназначенных для длительного хранения [3, 4]. Биобанк также предполагает наличие собственной инфраструктуры и информационной системы, в которой представлены подробные данные о входящих в него образцах [5]. Специалисты в области биобанкирования отмечают, что деятельность современного биобанка должна быть основана на стандартизированных процедурах забора, транспортировки, обработки и хранения биоматериала [6]. Высокое качество биообразцов и связанных с ними данных в свою очередь будет способствовать получению точных и воспроизводимых результатов исследований. В настоящее время в мире наиболее активно развиваются биобанки, связанные с человеком, однако, несмотря на огромную практическую и научную ценность, биобанкирование образцов животных осуществляется в меньшей степени [7]. Практика показала, что криоколлекции аннотированных образцов животного происхождения, хранящиеся в биобанках, являются важнейшим звеном биологической безопасности, они сохраняют информацию о генетическом разнообразии пород и описывают биоразнообразие в целом, могут быть использованы для научных и клинических исследований, связанных с различными заболеваниями животных и человека [8]. Подобные биобанки чрезвычайно важны для внедрения технологий геномной селекции, которые позволяют оценить генетический потенциал животного в раннем возрасте и уменьшить экономические издержки производителей сельскохозяйственной продукции [9].

Цель обзора – исследование состояния проблемы сохранения национальных генофондов сельскохозяйственных животных и анализ современных научных данных о биобанках генетических ресурсов животных на территории Российской Федерации (РФ) и других стран.

Материал и методы. Поиск информации проводили путем анализа иностранных и российских библиографических баз данных, научных электронных библиотек в поисковых системах: Web of Science, Scopus, eLIBRARY.RU, Cyberleninka, Springer, Pubmed, Google Scholar. Также проанализировали открытые базы данных зарубежных и российских биобанков и коллекций сельскохозяйственных животных. Статьи отбирали по ключевым словам: генофонд; биобанк; криоконсервация; *ex situ* сохранение; генетические ресурсы; порода; генные банки; биологические коллекции; сельскохозяйственные животные; биоматериалы. В соответствии с целью обзора отобраны и изучены данные 49 научных источников, опубликованных, преимущественно, за последние десять лет.

Основная часть. *1. Мировой опыт сохранения генетических ресурсов сельскохозяйственных животных.* Для успешного развития животноводства необходимо генетическое разнообразие, которое позволяет получать и поддерживать различные породы сельскохозяйственных животных. Именно они представляют собой важнейший стратегический ресурс, который используется селекционерами для внесения желаемых генетических изменений. На протяжении всей истории селекции породы сельскохозяйственных животных выводились, улучшались и отбраковывались в случае отсутствия рентабельности. Однако традиционные методы селекции требуют много времени, тогда как может возникнуть необходимость в быстром восстановлении ранее неперспективной породы, например, в случае изменения критериев отбора и потребностей производства или восстановления ценной популяции после эпидемии. И здесь на помощь сельхозпроизводителям, ученым и селекционерам могут прийти новые генетические технологии.

Главной международной структурой, выполняющей организационную и координирующую деятельность в области сохранения генофонда сельскохозяйственных животных, является Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных наций (ФАО). В рамках деятельности ФАО проводится мониторинг состояния генетических ресурсов сельскохозяйственных животных на мировом уровне и в различных странах. Актуальная информация по данному вопросу представлена в открытой информационной системе ФАО DAD-IS [10].

Со второй половины 20 века в мире фиксируется общее сокращение генетического разнообразия по всем видам домашнего скота и увеличение скорости исчезновения ранее выведенных пород сельскохозяйственных животных [11]. Так, например, во втором докладе ФАО о состоянии мировых генетических ресурсов сельскохозяйственных животных сообщалось, что с 2005 по 2014 г. доля соответствующих пород животных, находящихся под угрозой исчезновения, увеличилась с 15 до 17 %[1]. В качестве одной из причин специалисты указывают значительную степень генетической однородности внутри большинства массово разводимых высокопродуктивных пород, которая растет за счет интенсивного первичного отбора, небольшого числа животных-производителей и, как следствие, повышения инбридинга [12]. Сокращение генетических ресурсов сельскохозяйственных животных также связывают с уменьшением числа местных пород, которые находятся под угрозой исчезновения из-за вытеснения специализированными коммерческими породами. При этом утрата любой породы ведет к снижению генетического разнообразия в популяции и потере специфических признаков, которые будет невозможно восстановить [13].

Результатом многолетних скоординированных усилий специалистов разных стран по сохранению генофондов сельскохозяйственных животных стало принятие в 2007 г. в ходе Международной технической конференции по вопросам генетических ресурсов животных в г. Интерлакен (Швейцария) «Глобального плана действий по сохранению генетических ресурсов животных» и «Интерлакенской декларации о генетических ресурсах животных»[2] [14]. В соответствии с Глобальным планом, страны должны сочетать стратегии сохранения *in situ* и *ex situ*. Стратегия *in situ* означает создание мер по поддержанию и сохранению популяций животных в их природной среде обитания. Под *ex situ* подразумевается сохранение за пределами естественной среды обитания и включает содержание живых популяций (*ex situ in vivo)* в определенных контролируемых условиях и криоконсервацию (*ex situ in vitro)* биоматериалов[3] [11]. В рамках принятых стратегий одним из направлений работ по сохранению генофонда сельскохозяйственных животных является функционирование так называемых национальных генных банков или биобанков – специализированных структур, которые являются важным звеном продовольственной безопасности как отдельной страны, так и всего мира [15]. В генных банках

[1]The Second Report on the State of the World's Animal Genetic Resources for Food and Agriculture. FAO commission on genetic resources for food and agriculture assessments. 2015. [Электронный ресурс]. URL: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/recursos-geneticos/compromissos-internacionais/relatorios-nacionais/animais/rg-animais-2015.pdf (дата обращения: 17.03.2026).

[2]FAO. The Global plan of action for animal genetic resources. Commission on genetic resources for food and agriculture food and agriculture organization of the united nations Rome, 2007. [Электронный ресурс]. URL: https://www.fao.org/3/a1404e/a1404e.pdf (дата обращения: 01.07.2025).

[3]FAO. Guidelines on Cryoconservation of animal genetic resources. Aood and agriculture organization of the united nations Rome, 2012. [Электронный ресурс]. URL: https://www.fao.org/3/i3017e/i3017e.pdf (дата обращения: 01.07.2025).

обычно осуществляется сохранение *ex situ in vitro*. Официально первые генные банки начали появляться в конце 20 века, однако, многие из них начали работу на базе коллекций, существовавших ранее не одно десятилетие [16]. В 2015 г. подобные структуры были созданы в 64 странах, а в 2024 г. сообщалось о работе более 100 национальных генных банков сельскохозяйственных животных [15]. Основной задачей данных биобанков является создание условий для сохранения и восстановления экономически ценных и исчезающих пород сельскохозяйственных животных, а также сохранение редких или уникальных генотипов, обеспечивающих генетическое разнообразие в популяции, с помощью крио- и репродуктивных технологий [13, 17]. Для этого специалисты банков тщательно отбирают и хранят биоматериалы сельскохозяйственных животных. В обзоре 2016 года сообщалось, что по минимальным подсчетам во всех генных банках было собрано более 4 миллионов образцов от более чем 67000 пород животных [17]. По данным литературы, в настоящее время значительная часть генетических ресурсов в большинстве генных банков представлена в виде криоконсервированной спермы. Так, в Соединенных Штатах Америки (США) и странах Европы на ее долю приходится более 90 и 80 % от общего объема хранящегося материала соответственно [11, 18]. Остальную часть составляют эмбрионы, яйцеклетки, яичники, семенники, кровь и выделенная из нее ДНК и другие ткани [15, 16]. Размер коллекций в генном банке животных и представленность в них пород значительно варьирует и зависит от ряда причин: стратегии сохранения генетического разнообразия в конкретной стране; числа разводимых пород; размера финансирования данных исследований и т. д. [15, 19]. В коллекциях генных банков наиболее представлены криоматериалы основных видов сельскохозяйственных животных: крупного рогатого скота (КРС), овец, свиней, коз, лошадей, кур [16, 20]. Ряд стран, например, Канада, Франция, США и Нидерланды, включают в свои коллекции как основные, наиболее разводимые, так и второстепенные, менее распространенные породы сельскохозяйственных животных, в Бразилии также сохраняют генетические ресурсы местных видов, которые находятся в процессе одомашнивания [15, 21].

Помимо генных банков, биоматериалы сельскохозяйственных животных собирают также в менее крупных коллекциях, например в научно-исследовательских университетах и институтах, ветеринарных больницах, зоопарках, центрах по разведению, но эти ресурсы более закрыты и доступ к ним ограничен [17, 22].

2. *Крупнейшие мировые банки генетических ресурсов животноводства.*

США. Национальная лаборатория сохранения генетических ресурсов (*National Laboratory for Genetic Resources Preservation*, NLGRP) Министерства сельского хозяйства Соединенных Штатов, в штате Колорадо, хранит крупнейшую коллекцию биоматериалов культур растений и пород животных, имеющих важное значение для сельского хозяйства страны. Помимо того, что NLGRP является банком семян растений в форме прививаемых почек или культур *in vitro*[4], он также является хранилищем генетических ресурсов животных в форме криоконсервированной зародышевой плазмы (сперма, эмбрионы, яйцеклетки и другие ткани) [23, 24].

Национальная программа зародышевой плазмы животных (*National Animal Germplasm Program*, NAGP) Министерства сельского хозяйства была запущена в США в 1999 году для решения проблемы сохранения генетических ресурсов скота, птицы и водных животных. Она направлена на сбор и сохранение зародышевой плазмы различных домашних животных, включая крупный рогатый скот, овец, коз и свиней с целью повышения генетического разнообразия в популяции и совершенствования методов криоконсервации. Отмечается, что при отборе образцов для коллекции зародышевой плазмы основной акцент делается на максимальный охват генетического разнообразия для каждой породы [25]. По данным на июнь 2025 года, генетический материал в NAGP включал более 1,323 млн единиц зародышевой плазмы от 66882 животных, которые относятся к 2054 субпопуляциям, 176 породам, представляющим интерес для сельского хозяйства страны[5] [15]. Предоставляя доступ

[4]Agricultural Genetic Resources Preservation Research: Fort Collins, CO. [Электронный ресурс]. URL: https://www.ars.usda.gov/plains-area/fort-collins-co/center-for-agricultural-resources-research/paagrpru/ (дата обращения: 01.07.2025).

[5]National Animal Germplasm Program. United States Department of Agriculture Agricultural Research Service. [Электронный ресурс]. URL: https://agrin.ars.usda.gov/main_webpage_dev/ars?language=EN&record_source=US (дата обращения: 01.07.2025).

к сохраняемой зародышевой плазме, NAGP поддерживает селекционеров и исследователей, занимающихся повышением продуктивности и устойчивости к болезням сельскохозяйственных животных. Также данный ресурс используется для повышения генетического разнообразия, улучшения и сохранения поголовья животных и в целом для поддержания экономической и экологической устойчивости сельского хозяйства. В частности, в качестве показателя эффективного использования коллекции зародышевой плазмы животных сообщается об экономической отдаче в 400 млн долларов в год в результате развития технологий геномной селекции молочного скота [26]. Другим примером является использование владельцами редких пород крупного рогатого скота биоматериалов NAGP для восстановления генетических вариаций двух редких пород – декстер и молочный шортгорн [18].

Китай. Китай является одной из стран с самыми богатыми генетическими ресурсами сельскохозяйственных животных [27]. За последние десятилетия такие факторы, как перенаселенность, интенсификация животноводства и рост потребления продуктов аграрного сектора оказали негативное влияние на животное биоразнообразие в стране [28]. В 2005 г. в Китае был принят закон о животноводстве, в котором были прописаны три способа сохранения генетических ресурсов, входящих в Национальный список пород сельскохозяйственных животных: создание ферм; организация охраняемых территорий; формирование генных банков. Китай создал генные банки для сохранения генетических ресурсов на национальном уровне и в провинциях. Китайские национальные генные банки (*Chinese National Gene Banks for FAGR*, CNGBFs) отвечают за сохранение пород, имеющих статус национально охраняемых, а генные банки в провинциях – за местные породы животных. В обзоре 2024 г. сообщалось, что Китай намерен создать основной национальный банк ресурсов зародышевой плазмы сельскохозяйственных животных, несколько вспомогательных национальных генных банков и их резервные копии [29]. Основной национальный банк (*National farm animal germplasm resource bank*), нацеленный на долгосрочное стратегическое сохранение генетических материалов *in vitro,* создается Институтом животноводства Китайской академии сельскохозяйственных наук (*Institute of Animal Science of the Chinese Academy of Agricultural Sciences*). Завершено строительство 11 вспомогательных национальных генных банков, которые распределены по восьми регионам страны. Среди них Национальный генный банк животноводства (*National Livestock Gene Bank*) Китая отвечает за сохранение генетических материалов *in vitro,* а другие 10 вспомогательных национальных генных банков – за сохранение непосредственно самих животных. Законодательно к сохраняемым генетическим ресурсам в CNGBFs относятся как биоматериалы, так и непосредственно животные [29]. Специалисты CNGBFs должны обеспечивать сбор и хранение генетических материалов, таких как сперма, эмбрионы, яйцеклетки, ДНК и образцы крови, поступающих, в основном, с ферм по сохранению сельскохозяйственных животных и с охраняемых территорий. По данным Информационного бюро Государственного совета КНР, на 2021 г. в коллекции зародышевой плазмы на длительном хранении находилось 960 тысяч единиц образцов генетических ресурсов скота и птиц[6], а в 2024 г. сообщалось об увеличении указанной коллекции до 1,13 млн единиц[7].

В соответствии с законом о животноводстве, основными пользователями CNGBFs выступают университеты, научно-исследовательские институты и предприятия, занимающиеся фундаментальными исследованиями, без предоставления права коммерческого использования коллекций и доступа к ним частных пользователей [29].

Великобритания. Национальный генный банк сельскохозяйственных животных Великобритании (*UK National Livestock Gene Bank*) служит важным хранилищем генетического материала местных пород скота, находящихся под угрозой исчезновения[8]. Банк создан Фондом выживания редких пород (*Rare Breeds Survival*

[6]Biodiversity Conservation in China. The State Council Information Office of the People's Republic of China. 2021. [Электронный ресурс]. URL: https://www.mps.gov.cn/n2255079/n6865805/n7355748/n7355818/c8161022/content.html (дата обращения: 01.07.2025).
[7]China leads the world with largest agricultural germplasm collection: ministry, 2024. [Электронный ресурс]. URL: https://www.globaltimes.cn/page/202408/1318009.shtml (дата обращения: 01.07.2025).
[8]Rare Breeds Survival Trust. UK National Livestock Gene Bank, 2025. [Электронный ресурс]. URL: https://www.rbst.org.uk/gene-bank (дата обращения: 01.07.2025).

Trust, RBST), основанным как благотворительная организация в 1973 году, целью которого является сохранение и использование местных пород сельскохозяйственных животных в качестве устойчивой альтернативы интенсивно разводимым коммерческим породам[9]. Эта инициатива является частью широкой программы по сохранению генетического разнообразия в популяциях сельскохозяйственных животных в Великобритании. Национальный генетический банк отслеживает эффективные размеры популяций и показатели генетического разнообразия, чтобы оценить риски, связанные с инбридингом местных пород[10] [22]. RBST подчеркивает важность сохранения разнообразия пород не только из-за их сельскохозяйственной ценности, а также их культурного значения и вклада в экологическую устойчивость. Основная часть работы RBST заключается в сборе генетического материала в виде семени и эмбрионов редких и местных пород сельскохозяйственных животных (крупного рогатого скота, лошадей, овец, коз и свиней) Великобритании для защиты от сокращения численности и потенциальных угроз, связанных со вспышкой болезней. По правилам генного банка RBST селекционеры могут приобретать биоматериалы животных для своих программ разведения.

Европейские страны. В 2013 году были предприняты первые шаги по официальному созданию Европейской сети генных банков генетических ресурсов животных (*European Genebank Network for Animal Genetic Resources,* EUGENA). EUGENA объединяет 24 генных банка из 15 стран-участниц: Албании, Австрии, Болгарии, Венгрии, Италии, Латвии, Черногории, Нидерландов, Польши, Португалии, Румынии, Сербии, Словакии, Словении и Испании под эгидой Европейского регионального координационного центра по генетическим ресурсам животных с целью поддержки сохранения *ex situ* и устойчивого развития животноводства в Европе. Большинство генных банков официально начали работать в период с 1990 по 2010 г. на базе ранее созданных коллекций [16]. В 26 генных банках стран-участниц в настоящее время собрано 4873953 образцов генетических материалов сельскохозяйственных пород животных, из них более 90 % представляют семенной материал, а остальное приходиться на кровь/ДНК, эмбрионы, ткани яичников, стволовые клетки и другие ткани[11] (табл.). Страны-участницы EUGENA и их генные банки – собственники хранящихся генетических материалов.

Бразилия. На протяжении четырех десятилетий в Бразилии прилагаются усилия по сохранению генетических ресурсов сельскохозяйственных животных. В 1973 г. Федеральным правительством Бразилии была создана Embrapa – сельскохозяйственная исследовательская корпорация, которая обеспечивает проведение разработок и внедрение инновационных решений для устойчивого развития сельского хозяйства в стране. В настоящее время в основные виды деятельности Embrapa по сохранению генетических ресурсов страны входят все стратегии *in situ* и *ex situ* [30]. В 1974 г. Федеральное правительство Бразилии создало в рамках корпорации Embrapa Национальный исследовательский центр (*National Research Centre For Genetic Resources and Biotechnology*, Cenargen) для координации деятельности по сохранению биоразнообразия. В 1984 г. Cenargen стал Национальным исследовательским центром генетических ресурсов и биотехнологии, включив сохранение генетических ресурсов сельскохозяйственных животных с применением биотехнологии в свою исследовательскую программу, которая до этого рассматривала только растения [31]. Мероприятия по сохранению проводятся в рамках деятельности Бразильской сети генетических ресурсов (Renargen) и осуществляются различными исследовательскими центрами – Embrapa, университетами, государственными исследовательскими институтами, а также частными фермерами и курируются единым координатором – Cenargen [21]. Сохранение *in situ* крупного рогатого скота, лошадей, буйволов, ослов, коз, овец и свиней осуществляется в специальных стадах (*Conservation Nuclei*), которые находятся в изначальной среде обитания животных. Сохранение *ex situ* сосредоточено в Бразильском банке генов животных (BAGB), который отвечает за хранение генетического материала различных пород домашних животных, находящихся под угрозой исчезновения, под управлением Embrapa Genetics

[9]URL: https://www.rbst.org.uk/gene-bank (дата обращения: 01.07.2025).
[10]Animal genetic resources – effective population size of Native Breeds at Risk, 2024. [Электронный ресурс]. URL: https://jncc.gov.uk/our-work/ukbi-c9a-animal-genetic-resources (дата обращения: 01.07.2025).
[11]Countries EUGENA members, 2025. [Электронный ресурс]. URL: https://www.eugena-erfp.net/en/countries (дата обращения: 01.07.2025).

Resources and Biotechnology. BAGB состоит из Бразильского банка зародышевой плазмы животных (BBGA), где хранятся сперма, эмбрионы и соматические клетки, банка ДНК и тканей Embrapa (BDNA), в котором находятся образцы ДНК и тканей (кровь, кожа, волосы и т. д.) [32]. В настоящее время BBGA содержит коллекцию, включающую более 1,965 млн единиц зародышевой плазмы от 38187 животных, 101 породы разных видов с особым акцентом на бразильские породы и местные виды[12] [15].

Таблица – **Страны-участницы Европейской сети генных банков генетических ресурсов животных (EUGENA) и данные о биоматериалах в европейских генных банках (данные актуальны на июль 2025)[13] /**
Table – **Countries participating in European Gene Bank Network for Animal Genetic Resources (EUGENA) and data on biomaterials in European gene banks (data for July 2025)**

Страна-участница EUGENA / EUGENA member country	*Число генных банков / Number of gene banks*	*Вид / Species*	*Порода / Breed*	*Количество образцов / Number of samples*
Албания / Albania	0	0	0	0
Австрия / Austria	2	4	45	414595
Болгария / Bulgaria	1	2	32	428872
Венгрия / Hungary	1	10	33	19413
Италия / Italy	0	0	0	0
Латвия / Latvia	1	5	12	5693
Черногория / Montenegro	1	3	8	568
Нидерланды / Netherlands	1	11	158	547591
Польша / Poland	2	3	15	438120
Португалия / Portugal	1	6	41	265929
Румыния / Romania	0	0	0	0
Сербия / Serbia	3	4	18	263827
Словакия / Slovakia	1	6	16	4369
Словения / Slovenia	0	0	0	0
Испания / Spain	15	8	125	3025676

Индия. Индия обладает обширными генетическими ресурсами пород сельскохозяйственных животных как по числу, так и по разнообразию. По данным переписи 2012 г., на территорию страны приходилось 11,6 % всей численности скота в мире [33]. В Индии работу по *in vitro* сохранению генетических ресурсов местных пород сельскохозяйственных животных, необходимую для обеспечения продовольственной безопасности и развития сельского хозяйства, ведет Национальный генный банк (*The National Live stock GeneBank*). Создан Национальным бюро генетических ресурсов животных (*National Bureau of Animal Genetic Resources*, ICAR) в Карнале. Специалисты генного банка собирают по всей стране и сохраняют сперму, эмбрионы и другие биоматериалы различных местных пород животных, адаптированных к конкретным климатическим условиям [34]. По данным 2024 г., в банке хранилось 306948 доз спермы от 590 производителей 7 видов (КРС, буйволы, козы, овцы, верблюды, лошади и яки), 63 пород[14].

[12]Conservation of Genetic Resources of Animals, 2025. [Электронный ресурс]. URL: https://agrin.ars.usda.gov/main_webpage_dev/embrapa?language=EN&record_source=BR (дата обращения: 01.07.2025).
[13]URL: https://www.eugena-erfp.net/en/countries
[14]Animal Genetic Resources Portal, 2024. Animal Genetic Resources – An Overview. [Электронный ресурс]. URL: http://14.139.252.116/agrportal/AnGR.htm (дата обращения: 01.07.2025).

3. *Биобанки сельскохозяйственных животных в России*. В России, благодаря естественному отбору и селекционной работе, в различных регионах, значительно отличающихся по условиям разведения (климатическим, ландшафтным и т. д.), появилось огромное количество пород сельскохозяйственных животных. На сентябрь 2023 г. в Государственном реестре было представлено 864 селекционных достижения допущенных к использованию (447 пород, 141 тип, 136 кроссов и 140 линий) 51 вида животных[15]. К сожалению, как и во всем мире, в последние десятилетия в Российской Федерации нарастает процесс снижения численности сельскохозяйственных животных местных пород до предела, угрожающего их существованию. С 2009 г. количество племенных стад отечественных пород молочного скота сократилось в 2,4 раза [35]. За последние 30 лет в России исчезли три генофондные породы КРС – курганская, юринская и северная комолая [36]. Исчезли многие отечественные породы свиней или находятся на грани исчезновения [37]. Численность лошадей в нашей стране сократилась в 2 раза по сравнению с уровнем 1991 г. [38]. Многократно отмечалось, что одна из основных причин сокращения национального генофонда сельскохозяйственных животных связана с сильнейшей конкуренцией с ввозимым из-за рубежа племенным молодняком всех видов [14, 38, 39]. Зарубежные коммерческие породы, в силу большей продуктивности, вытесняют отечественные местные породы, которые обладают комплексом важных хозяйственно-полезных качеств, а также высоким адаптационным потенциалом к разным регионам обитания и условиям разведения в нашей стране [40, 41]. В силу ряда причин в РФ произошло сокращение общей численности различных видов животных. Все это в целом привело к критическому обеднению как породного, так и видового генетического разнообразия сельскохозяйственных животных в нашей стране.

В настоящее время в России *ex situ* сохранение генетических ресурсов сельскохозяйственных животных осуществляется как *in vivo* в генофондных стадах, так и *in vitro* в коллекциях (биобанках), содержащих семя, эмбрионы и другие биоматериалы. На 2023 г. в Государственном племенном регистре Российской Федерации было зарегистрировано 83 генофондных хозяйства по разведению 63 пород 16 видов сельскохозяйственных животных (из них 42 отечественные породы) [42]. По данным исследования Е. В. Алпеевой с соавторами, наблюдается значительный разрыв, если сравнивать общее число биоколлекций и научных центров в России, занимающихся биоконсервацией для нужд сельского хозяйства, медицины, ветеринарии и фундаментальных исследований, с развитыми странами мира. Авторы сообщают о наличии в РФ около 300 различных задокументированных биоколлекций, из которых 255 финансируется Министерством науки и высшего образования. Показано, что на 2023 г. из общего числа биоколлекций на биобанки всех видов живых организмов приходилось 5,88 %. Причем авторы под биобанками имеют в виду биоколлекции, материалы которых могут быть предоставлены по запросу безвозмездно или на платной основе [43].

Криоконсервация, как метод сохранения генетических ресурсов животных, применяется в России не одно десятилетие. В 1947 г. советские ученые В. К. Милованов, И. И. Соколовская, И. В. Смирнов на примере семени млекопитающих показали возможность сохранения биологической функциональности материала животных после длительной глубокой заморозки [44]. В дальнейшем эта технология была усовершенствована и стала применяться для создания биобанков племенного материала сельскохозяйственных животных, используемых для научных исследований и практической селекционной работы.

В России крупнейшая коллекция генетического материала, включающая более 300 тысяч образцов семени, эмбрионов, тканей, ДНК домашних и диких животных, птиц, находится в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста» [45, 46]. Во Всероссийском научно-исследовательском институте овцеводства и козоводства – филиале Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр» создан и поддерживается криобанк, в котором содержится

[15]Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 2. «Породы животных» [Электронный ресурс]. URL: https://mcx.gov.ru/upload/iblock/105/bg03fe763msw9tej630aztpik2mrxakx.pdf (дата обращения: 17.03.2026).

более 28000 доз семени от высокопродуктивных особей, представляющих 16 пород баранов и 3 породы козлов[16] [47]. В ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт коневодства имени академика В. В. Калашникова» в старейшей коллекции замороженной спермы жеребцов-производителей в настоящее время хранится 1974 единицы образцов 17 пород отечественной и зарубежной селекции[17]. Неоднократно подтверждалась высокая сохранность биоматериала данной коллекции, что в очередной раз было показано рождением в 2024 г. жеребят терской породы с применением спермы, замороженной более 50 лет назад [38]. В ФГБНУ «Федеральный научный центр пчеловодства» хранится 60 единиц семени трутней 6 пород пчел[18] [48].

В 2021 г. в рамках выполнения проекта Минобрнауки России вышеуказанные организации приступили к объединению в единую информационную платформу данных об имеющихся биоколлекциях для формирования сетевой биоресурсной коллекции сельскохозяйственных животных, птиц, рыб и насекомых (сБРК СХЖ). Фонды биоколлекций, помимо репродуктивных материалов (семя, эмбрионы, генеративные клетки), включают банки биоматериалов и ДНК, музейные образцы и непосредственно самих животных в разведении. В соответствии с положением сайт сБРК СХЖ будет доступен для исследователей, селекционеров и производителей сельскохозяйственной продукции[19]. Важными результатами реализации проекта должно стать пополнение коллекций, внедрение стандартизированных требований работы с биологическими материалами различного типа, создание геномных паспортов пород. Основной целью проекта является сохранение биоразнообразия видов и пород сельскохозяйственных животных в РФ.

Мировой опыт показывает, что для сохранения генофондов отечественных сельскохозяйственных видов и пород животных в РФ необходима разработка национальной стратегии, в том числе законодательной базы, государственных программ, структур управления и особой инфраструктуры [40, 41, 49].

Важным шагом в области сохранения генофонда сельскохозяйственных животных в нашей стране стало подписание 19 марта 2024 г. Президентом РФ Указа о создании на базе Федерального исследовательского Центра им. Л. К. Эрнста Национального центра генетических ресурсов сельскохозяйственных животных[20]. В октябре 2024 года была утверждена Программа развития Национального центра генетических ресурсов сельскохозяйственных животных (далее Национальный центр) на 2024–2030 гг.[21]. Важнейшим результатом реализации программы развития центра станет формирование национального каталога особо ценных образцов генетических ресурсов сельскохозяйственных животных на основе результатов инвентаризации биологических коллекций, ранее созданных в государственных научных и образовательных учреждениях на территории РФ. В дальнейшем все образцы национального каталога будут храниться в специальных условиях, гарантирующих сохранение функциональных единиц наследственности в течение длительного времени. Также в рамках программы развития Национального центра планируется планомерное пополнение каталога, развитие специализированной инфраструктуры, разработка методик получения, хранения, оценки и использования образцов генетических ресурсов сельскохозяйственных животных, подготовка квалифицированных кадров в области сохранения животного генофонда. В дальнейшем криобанки станут основной формой сохранения генетических ресурсов сельскохозяйственных животных.

[16]Центр коллективного пользования (ЦКП) «Генофондное хранилище криоконсервированной спермы МРС». [Электронный ресурс]. URL: https://fnac.center/ckp-vniiok/ (дата обращения: 01.07.2025).
[17]Биоколлекция. Веб сайт ФГБНУ «ВНИИ коневодства». [Электронный ресурс]. URL: https://www.ruhorses.ru/biocollection/ru (дата обращения: 01.07.2025).
[18]Криобанк спермы медоносной пчелы. Веб сайт ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л. К. Эрнста. [Электронный ресурс]. URL: https://brc.vij.ru/index.php/2023-07-17-13-18-22?view=article&id=19&catid=2 (дата обращения: 01.07.2025).
[19]Сетевая биоресурсная коллекция сельскохозяйственных животных, птиц, рыб и насекомых. Веб сайт ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л. К. Эрнста. [Электронный ресурс]. URL: https://brc.vij.ru/ (дата обращения: 01.07.2025).
[20]Криобанк спермы медоносной пчелы. Веб сайт ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л. К. Эрнста. [Электронный ресурс]. URL: https://brc.vij.ru/index.php/2023-07-17-13-18-22?view=article&id=19&catid=2 (дата обращения: 01.07.2025).
[21]Сетевая биоресурсная коллекция сельскохозяйственных животных, птиц, рыб и насекомых. Веб сайт ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л. К. Эрнста. [Электронный ресурс]. URL: https://brc.vij.ru/ (дата обращения: 01.07.2025).

Заключение. Во всем мире наблюдается общая тенденция сокращения генетического разнообразия в отношении различных видов животных. Исследования показывают, что биобанки играют важнейшую роль в мировых усилиях по сохранению, изучению и эффективному использованию генетических ресурсов сельскохозяйственных животных. Об этом свидетельствует рост числа биобанков в разных странах, а также системное расширение существующих зарубежных коллекций как по породному и видовому составу, так и по числу сохраняемых образцов. В РФ в ряде специализированных организаций поддерживаются *ex situ* коллекции генетических ресурсов сельскохозяйственных животных, а также диких родственных видов, однако число коллекций и их наполненность значительно уступают зарубежным. В последние годы в нашей стране началась реализация проектов, направленных на решение данной проблемы и в целом на сохранение отечественного генофонда сельскохозяйственных животных.

Список литературы

1. Астрелина Т. А., Самойлов А. С. Особенности деятельности биологических банков: мировая практика. Клинический вестник ФМБЦ им. А. И. Бурназяна. 2022;(2):45–48. DOI: https://doi.org/10.33266/2782-6430-2022-2-45-48 EDN: TQPYAI

2. Арипова Т. У., Рузибакиева М. Р., Рыскулов Ф. Т. Биобанки и их значение в современном мире. Журнал теоретической и клинической медицины. 2024;(4):53–57. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=73875887 EDN: EKBXKD

3. Harati M. D., Williams R. R., Movassaghi M., Hojat A., Lucey G. M., Yong W. H. An Introduction to Starting a Biobank. Biobanking. Methods in Molecular Biology. 2019;1897:7–16. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8935-5_2

4. Березина Г. М., Мирзахметова Д. Д., Святова Г. С., Терликбаева А. Т., Муртазалиева А. В. Организация биобанка ДНК и его роль в научных исследованиях. Наука и здравоохранение. 2021;23(4):208–217. DOI: https://doi.org/10.34689/SH.2021.23.4.023 EDN: OREZWO

5. Мешков А. Н., Ярцева О. Ю., Борисова А. Л., Покровская М. С., Драпкина О. М. от имени экспертной группы НАСБИО. Концепция национальной информационной платформы биобанков Российской Федерации. Кардиоваскулярная терапия и профилактика. 2022;21(11):3417. DOI: https://doi.org/10.15829/1728-8800-2022-3417 EDN: ODHEXV

6. Балановская Е. В., Жабагин М. К., Агджоян А. Т., Чухряева М. И., Маркина Н. В., Балаганская О. А. и др. Популяционные биобанки: принципы организации и перспективы применения в геногеографии и персонализированной медицине. Генетика. 2016;52(12):1371–1387. DOI: https://doi.org/10.7868/S001667581612002X EDN: XGWBBB

7. Groeneveld L. F., Gregusson S., Guldbrandtsen B., Hiemstra S. J., Hveem K., Kantanen J. et al. Domesticated Animal Biobanking: Land of Opportunity. PLoS Biology. 2016;14(7):e1002523. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002523

8. LaLonde-Paul D., Mouttham L., Promislow D. E. L., Castelhano M. G. Banking on a new understanding: translational opportunities from veterinary biobanks. GeroScience. 2023;45(3):1439–1450. DOI: https://doi.org/10.1007/s11357-023-00763-z

9. Столповский Ю. А., Пискунов А. К., Свищева Г. Р. Геномная селекция. I. Последние тенденции и возможные пути развития. Генетика. 2020;56(9):1006–1017. DOI: https://doi.org/10.31857/S0016675820090143 EDN: SIFGKO

10. Delgado Bermejo J. V., Martinez Martínez M. A., Rodríguez Galvan G., Stemmer A., Navas Gonzalez F. J., Camacho Vallejo M. E. Organization and Management of Conservation Programs and Research in Domestic Animal Genetic Resources. Diversity. 2019;11(12):235. DOI: https://doi.org/10.3390/d11120235

11. Blackburn H. D. Biobanking genetic material for agricultural animal species. Annual review of animal biosciences. 2018;6(1):69–82. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-animal-030117-014603

12. Gutiérrez-Reinoso M. A., Aponte P. M., García-Herreros M. A review of inbreeding depression in dairy cattle: current status, emerging control strategies, and future prospects. Journal of Dairy Research. 2022;89(1):3–12. DOI: https://doi.org/10.1017/S0022029922000188

13. Djedovic R., Radojkovic D., Stanojevic D., Savic R., Vukasinovic N., Popovac M. et al. Base characteristics, preservation methods, and assessment of the genetic diversity of autochthonous breeds of cattle, sheep and pigs in Serbia: A Review. Animals (Basel). 2024;14(13):1894. DOI: https://doi.org/10.3390/ani14131894

14. Станишевская О. И., Черепанов С. В., Силюкова Ю. Л. Организационные аспекты сохранения генетических ресурсов сельскохозяйственных животных: мировой опыт. Генетика и разведение животных. 2017;(3):3–11. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32340644 EDN: YMYKSH

15. Blackburn H. D., Lozada-Soto E., Paiva S. R. Biobanking animal genetic resources: critical infrastructure and growth opportunities. Trends in Genetics. 2024;40(2):115–117. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tig.2023.11.004

16. Heimstra S. J., Martyniuk E., Duchev Z., Begemann F. European gene bank network for animal genetic resources (EUGENA). Proceedings, 10th World Congress of Genetics Applied to Livestock Production. Canada: Vancouver, 2014. 3 p. URL: https://www.asas.org/docs/default-source/wcgalp-posters/437_paper_8691_manuscript_289_0.pdf

17. Paiva S. R., McManus C. M., Blackburn H. Conservation of animal genetic resources – A new tact. Livestock Science. 2016;193:32–38. DOI: https://doi.org/10.1016/j.livsci.2016.09.010

18. Blackburn H. D., Wilson C. S., Krehbiel B. Conservation and utilization of livestock genetic diversity in the United States of America through gene banking. Diversity. 2019;11(12):244. DOI: https://doi.org/10.3390/d11120244

19. Blackburn H. D., Azevedo H. C., Purdy P. H. Incorporation of Biotechnologies into Gene Banking Strategies to Facilitate Rapid Reconstitution of Populations. Animals. 2023;13(20):3169. DOI: https://doi.org/10.3390/ani13203169

20. Ren Q., Gong Y., Su P., Liu G., Pu Y., Yu F. et al. How Developments in Genebanks Could Shape Utilization Strategies for Domestic Animals. Agriculture. 2025;15(2):133. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture15020133

21. Orth D., Ramos A. F., Carvalho G. M. C., Basílio L. M. S., Caetano A. R., Ianella P. Genomic characterization of the Brazilian CriouloLageano: Insights for conservation of a Brazilian local bovine breed. Livestock Science. 2024;284:105481. DOI: https://doi.org/10.1016/j.livsci.2024.105481

22. De Oliveira Silva R., Ahmadi B. V., Hiemstra S. J., Moran D. Optimizing ex situ genetic resource collections for European livestock conservation. Journal of Animal Breeding and Genetics. 2019;136(1):63–73. DOI: https://doi.org/10.1111/jbg.12368

23. Jenderek M. M., Ambruzs B. D., Yeater K. M., Reed B. M. Evaluating shoot-tip regrowth of 25 Rubus L. species and hybrids after 15 to 20 years of cryopreserved storage. Cryobiology. 2025;118:105159. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2024.105159

24. Azevedo H. C., Blackburn H. D., Lozada-Soto E. A., Spiller S. F., Purdy P. H. Enhancing evaluation of bull fertility through multivariate analysis of sperm. Journal of Dairy Science. 2024;107(12):11774–11784. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2024-25163

25. McManus C., Hermuche P. M., Paiva S. R., Guimarães R. F., Junior O. A. C., Blackburn H. D. Gene bank collection strategies based upon geographic and environmental indicators for beef breeds in the United States of America. Livestock Science. 2021;254:104766. DOI: https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104766

26. Rexroad C., Vallet J., Matukumalli L. K., Reecy J., Bickhart D., Blackburn H. et al. Genome to Phenome: Improving Animal Health, Production, and Well-Being - A New USDA Blueprint for Animal Genome Research 2018-2027. Frontiers in Genetics. 2019;10:327. DOI: https://doi.org/10.3389/fgene.2019.00327

27. Wang W., Feng C., Liu F., Li J. Biodiversity conservation in China: A review of recent studies and practices. Environmental Science and Ecotechnology. 2020;2:100025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ese.2020.100025

28. Deng H., Jin Y., Pray C., Hu R., Xia E., Meng H. Impact of public research and development and extension on agricultural productivity in China from 1990 to 2013. China Economic Review. 2021;70:101699. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chieco.2021.101699

29. Chen Q., Fan C. T., Jiao H. The current status and improvement directions of legal rules regarding Chinese national gene banks for farm animal genetic resources. Frontiers in Genetics. 2024;15:1413625. DOI: https://doi.org/10.3389/fgene.2024.1413625

30. Machado L. C., Oliveira V. C., Paraventi M. D., Cardoso R. N., Martins D. S., Ambrósio C. E. Maintenance of Brazilian Biodiversity by germplasm bank. Pesquisa Veterinária Brasileira. 2016;36(1):62–66. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-736X2016000100010

31. Mariante A. D. S., do SM Albuquerque M., Egito A. D., McManus C., Lopes M. A., Paiva S. R. Present status of the conservation of livestock genetic resources in Brazil. Livestock Science. 2009;120(3):204–212. DOI: https://doi.org/10.1016/j.livsci.2008.07.007

32. Fonseca J. F., Silva K. D. M. Brazilian Germplasm Bank: conservation of genetic resources of sheep and goats. (Embrapa Caprinos e Ovinos. Documentos, 142). Sobral: Embrapa Caprinos e Ovinos, 2021. 25 p. URL: http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/230303/1/CNPC-2021-Art99.pdf

33. Ahmad S., Kour G., Singh A., Gulzar M. Animal genetic resources of India-an overview. International Journal of Livestock Research. 2019;9(3):1–12. DOI: https://doi.org/10.5455/ijlr.20181025013931

34. Vani A., Singh R., Tiwari V. K., Gangwar M., Mir M., Hussain P. C., Saini T. Conservation of animal genetic resources in India: The gene bank approach. The Pharma Innovation Journal. 2022;11(11S):1262–1264.

35. Чинаров В. И. Пространственное развитие и преобразование генофонда молочного скота России. Молочное и мясное скотоводство. 2024;(4):7–12. DOI: https://doi.org/10.33943/MMS.2024.63.86.002 EDN: GXZJFA

36. Паронян И. А. Современное состояние генофонда молочных и молочно-мясных пород крупного рогатого скота в Российской Федерации. Достижения науки и техники АПК. 2020;34(6):79–83. DOI: https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10615 EDN: NPVCVQ

37. Амерханов Х. А., Колдаева Е. М. Проблемы сохранения породного разнообразия сельскохозяйственных животных в Российской Федерации. Известия Международной академии аграрного образования. 2023;(65):158–161. Режим доступа: http://maaorus.ru/assets/files/journals/izvestiya-maao-vypusk-65.pdf#page=158

38. Калашников В. В., Зайцев А. М., Лебедева Л. Ф. Генетические ресурсы коневодства России и биотехнологические методы их сохранения. Коневодство и конный спорт. 2024;(3):4–9. DOI: https://doi.org/10.25727/HS.2024.3.60837 EDN: HRJQER

39. Бабенков В. Ю., Чимидова Н. В., Хахлинов А. И., Убушиева А. В., Манжиев В. И. Роль репродуктивных биотехнологий в воспроизводстве и сохранении генофонда редких и исчезающих пород крупного рогатого скота. Животноводство и кормопроизводство. 2023;106(1):67–76. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50753393 EDN: YJQWOI

40. Столповский Ю. А., Захаров-Гезехус И. А. Проблема сохранения генофондов доместицированных животных. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2017;21(4):477–486. DOI: https://doi.org/10.18699/VJ17.266 EDN: YTZYFR

41. Улимбашев М. Б., Кулинцев В. В., Селионова М. И., Улимбашева Р. А., Абилов Б. Т., Алагирова Ж. Т. Рациональное использование генофонда ценных пород животных с целью сохранения биологического разнообразия. Юг России: экология, развитие. 2018;13(2):165–183. DOI: https://doi.org/10.18470/1992-1098-2018-2-165-183 EDN: XUTKHB

42. Столповский Ю. А., Бекетов С. В., Солоднева Е. В., Кузнецов С. Б. Сохранение генетических ресурсов сельскохозяйственных животных. Главный зоотехник. 2024;(3):3–18. DOI: https://doi.org/10.33920/sel-03-2403-01 EDN: CWYNQN

43. Alpeeva E. V., Sharova N. P., Sharov K. S., Vorotelyak E. A. Russian biodiversity collections: A professional opinion survey. Animals. 2023;13(24):3777. DOI: https://doi.org/10.3390/ani13243777

44. Милованов В. К. Биология воспроизведения и искусственное осеменение животных. М.: Изд-во с.-х. литературы, журналов и плакатов, 1962. 696 с.

45. Koshkina O., Deniskova T., Dotsev A., Kunz E., Selionova M., Medugorac I., Zinovieva N. Phylogenetic analysis of Russian native sheep breeds based on mtDNA sequences. Genes. 2023;14(9):1701. DOI: https://doi.org/10.3390/genes14091701

46. Багиров В. А., Зиновьева Н. А. Современное состояние и мировой опыт сохранения генетических ресурсов сельскохозяйственных животных. Успехи наук о животных. 2024;(1):5–24. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82336444 EDN: HFWUEH

47. Айбазов М. М., Мамонтова Т. В. Создание биоресурсных коллекций–необходимое условие сохранения и рационального использования генетических ресурсов животных. Сельскохозяйственный журнал. 2018;2(11):54–62. DOI: https://doi.org/10.25930/47pm-n875 EDN: HTBEVL

48. Gulov A. N., Berezin A. S., Larkina E. O., Saltykova E. S., Kaskinova M. D. Creation of a Biobank of the Sperm of the Honey Bee Drones of Different Subspecies of *Apis mellifera* L. Animals 2023;13(23):3684. DOI: https://doi.org/10.3390/ani13233684

49. Зиновьева Н. А., Фисинин В. И., Багиров В. А., Костюнина О. В., Гладырь Е. А. Биоресурсные центры как форма сохранения генетических ресурсов животных сельскохозяйственного назначения. Достижения науки и техники АПК. 2013;(11):40–41. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20678305 EDN: RKNCCF

References

1. Astrelina T. A., Samoilov A. S. Features of the activity of biological banks: world practice. *Klinichesky vestnik FMBTs im. A. I. Burnazyana* = A. I. Burnasyan FMBC clinical bulletin. 2022;(2):45–48. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.33266/2782-6430-2022-2-45-48

2. Aripova T. U., Ruzibakiyeva M. R., Riskulov F. T. Biobanks and their importance in the modern world. *Zhurnal teoreticheskoy i klinicheskoy meditsini* = Journal of Theoretical and Clinical Medicine. 2024;(4):53–57. (In Uzbekistan). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=73875887

3. Harati M. D., Williams R. R., Movassaghi M., Hojat A., Lucey G. M., Yong W. H. An Introduction to Starting a Biobank. Biobanking. Methods in Molecular Biology. 2019;1897:7–16. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8935-5_2

4. Berezina G. M., Mirzakhmetova D. D., Svyatova G. S., Terlikbayeva A. T., Murtazaliyeva A. V. Organizatsiya biobanka DNK i yego rol v nauchnikh issledovaniyakh. *Nauka i zdravookhraneniye* = Science and Healthcare. 2021;23(4):208–217. (In Kazastan). DOI: https://doi.org/10.34689/SH.2021.23.4.023

5. Meshkov A. N., Yartseva O. Yu., Borisova A. L., Pokrovskaya M. S., Drapkina O. M. The concept of the national information platform of biobanks of the Russian Federation. *Kardiovaskulyarnaya terapiya i profilaktika* = Cardiovascular Therapy and Prevention. 2022;21(11):3417. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.15829/1728-8800-2022-3417

6. Balanovskaya E. V., Zhabagin M. K., Agdzhoyan A. T., Chukhryayeva M. I., Markina N. V., Balaganskaya O. A. et al. Population biobanks: organizational models and prospects of application in gene geography and personalized medicine. *Genetika* = Russian Journal of Genetics. 2016;52(12):1371–1387. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.7868/S001667581612002X

7. Groeneveld L. F., Gregusson S., Guldbrandtsen B., Hiemstra S. J., Hveem K., Kantanen J. et al. Domesticated Animal Biobanking: Land of Opportunity. PLoS Biology. 2016;14(7):e1002523. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002523

8. LaLonde-Paul D., Mouttham L., Promislow D. E. L., Castelhano M. G. Banking on a new understanding: translational opportunities from veterinary biobanks. GeroScience. 2023;45(3):1439–1450. DOI: https://doi.org/10.1007/s11357-023-00763-z

9. Stolpovsky Yu. A., Piskunov A. K., Svishcheva G. R. Genomic selection. i: latest trends and possible ways of development. *Genetika* = Russian Journal of Genetics. 2020;56(9):1006–1017. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.31857/S0016675820090143

10. Delgado Bermejo J. V., Martinez Martínez M. A., Rodríguez Galvan G., Stemmer A., Navas Gonzalez F. J., Camacho Vallejo M. E. Organization and Management of Conservation Programs and Research in Domestic Animal Genetic Resources. Diversity. 2019;11(12):235. DOI: https://doi.org/10.3390/d11120235

11. Blackburn H. D. Biobanking genetic material for agricultural animal species. Annual review of animal biosciences. 2018;6(1):69–82. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-animal-030117-014603

12. Gutiérrez-Reinoso M. A., Aponte P. M., García-Herreros M. A review of inbreeding depression in dairy cattle: current status, emerging control strategies, and future prospects. Journal of Dairy Research. 2022;89(1):3–12. DOI: https://doi.org/10.1017/S0022029922000188

13. Djedovic R., Radojkovic D., Stanojevic D., Savic R., Vukasinovic N., Popovac M. et al. Base characteristics, preservation methods, and assessment of the genetic diversity of autochthonous breeds of cattle, sheep and pigs in Serbia: A Review. Animals (Basel). 2024;14(13):1894. DOI: https://doi.org/10.3390/ani14131894

14. Stanishevskaya O. I., Cherepanov S. V., Silyukova Yu. L. Organizational aspects of genetic resources preservation in farm animals: world experience. *Genetika i razvedeniye zhivotnikh* = Genetics and breeding of animals. 2017;(3):3–11. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32340644

15. Blackburn H. D., Lozada-Soto E., Paiva S. R. Biobanking animal genetic resources: critical infrastructure and growth opportunities. Trends in Genetics. 2024;40(2):115–117. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tig.2023.11.004

16. Heimstra S. J., Martyniuk E., Duchev Z., Begemann F. European gene bank network for animal genetic resources (EUGENA). Proceedings, 10th World Congress of Genetics Applied to Livestock Production. Canada: Vancouver, 2014. 3 p. URL: https://www.asas.org/docs/default-source/wcgalp-posters/437_paper_8691_manuscript_289_0.pdf

17. Paiva S. R., McManus C. M., Blackburn H. Conservation of animal genetic resources – A new tact. Livestock Science. 2016;193:32–38. DOI: https://doi.org/10.1016/j.livsci.2016.09.010

18. Blackburn H. D., Wilson C. S., Krehbiel B. Conservation and utilization of livestock genetic diversity in the United States of America through gene banking. Diversity. 2019;11(12):244. DOI: https://doi.org/10.3390/d11120244

19. Blackburn H. D., Azevedo H. C., Purdy P. H. Incorporation of Biotechnologies into Gene Banking Strategies to Facilitate Rapid Reconstitution of Populations. Animals. 2023;13(20):3169. DOI: https://doi.org/10.3390/ani13203169

20. Ren Q., Gong Y., Su P., Liu G., Pu Y., Yu F. et al. How Developments in Genebanks Could Shape Utilization Strategies for Domestic Animals. Agriculture. 2025;15(2):133. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture15020133

21. Orth D., Ramos A. F., Carvalho G. M. C., Basílio L. M. S., Caetano A. R., Ianella P. Genomic characterization of the Brazilian CriouloLageano: Insights for conservation of a Brazilian local bovine breed. Livestock Science. 2024;284:105481. DOI: https://doi.org/10.1016/j.livsci.2024.105481

22. De Oliveira Silva R., Ahmadi B. V., Hiemstra S. J., Moran D. Optimizing ex situ genetic resource collections for European livestock conservation. Journal of Animal Breeding and Genetics. 2019;136(1):63–73. DOI: https://doi.org/10.1111/jbg.12368

23. Jenderek M. M., Ambruzs B. D., Yeater K. M., Reed B. M. Evaluating shoot-tip regrowth of 25 Rubus L. species and hybrids after 15 to 20 years of cryopreserved storage. Cryobiology. 2025;118:105159. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cryobiol.2024.105159

24. Azevedo H. C., Blackburn H. D., Lozada-Soto E. A., Spiller S. F., Purdy P. H. Enhancing evaluation of bull fertility through multivariate analysis of sperm. Journal of Dairy Science. 2024;107(12):11774–11784. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2024-25163

25. McManus C., Hermuche P. M., Paiva S. R., Guimarães R. F., Junior O. A. C., Blackburn H. D. Gene bank collection strategies based upon geographic and environmental indicators for beef breeds in the United States of America. Livestock Science. 2021;254:104766. DOI: https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104766

26. Rexroad C., Vallet J., Matukumalli L. K., Reecy J., Bickhart D., Blackburn H. et al. Genome to Phenome: Improving Animal Health, Production, and Well-Being - A New USDA Blueprint for Animal Genome Research 2018-2027. Frontiers in Genetics. 2019;10:327. DOI: https://doi.org/10.3389/fgene.2019.00327

27. Wang W., Feng C., Liu F., Li J. Biodiversity conservation in China: A review of recent studies and practices. Environmental Science and Ecotechnology. 2020;2:100025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ese.2020.100025

28. Deng H., Jin Y., Pray C., Hu R., Xia E., Meng H. Impact of public research and development and extension on agricultural productivity in China from 1990 to 2013. China Economic Review. 2021;70:101699. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chieco.2021.101699

29. Chen Q., Fan C. T., Jiao H. The current status and improvement directions of legal rules regarding Chinese national gene banks for farm animal genetic resources. Frontiers in Genetics. 2024;15:1413625. DOI: https://doi.org/10.3389/fgene.2024.1413625

30. Machado L. C., Oliveira V. C., Paraventi M. D., Cardoso R. N., Martins D. S., Ambrósio C. E. Maintenance of Brazilian Biodiversity by germplasm bank. Pesquisa Veterinária Brasileira. 2016;36(1):62–66. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-736X2016000100010

31. Mariante A. D. S., do SM Albuquerque M., Egito A. D., McManus C., Lopes M. A., Paiva S. R. Present status of the conservation of livestock genetic resources in Brazil. Livestock Science. 2009;120(3):204–212. DOI: https://doi.org/10.1016/j.livsci.2008.07.007

32. Fonseca J. F., Silva K. D. M. Brazilian Germplasm Bank: conservation of genetic resources of sheep and goats. (Embrapa Caprinos e Ovinos. Documentos, 142). Sobral: Embrapa Caprinos e Ovinos, 2021. 25 p. URL: http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/230303/1/CNPC-2021-Art99.pdf

33. Ahmad S., Kour G., Singh A., Gulzar M. Animal genetic resources of India-an overview. International Journal of Livestock Research. 2019;9(3):1–12. DOI: https://doi.org/10.5455/ijlr.20181025013931

34. Vani A., Singh R., Tiwari V. K., Gangwar M., Mir M., Hussain P. C., Saini T. Conservation of animal genetic resources in India: The gene bank approach. The Pharma Innovation Journal. 2022;11(11S):1262–1264.

35. Chinarov V. I. Territorial development and transformation of the gene pool in Russian dairy cattle breeding. *Molochnoye i myasnoye skotovodstvo* = Journal of Dairy and Beef Cattle Farming. 2024;(4):7–12. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.33943/MMS.2024.63.86.002

36. Paronyan I. A. The current state of the gene pool of dairy and dairy-meat cattle breeds in the Russian Federation. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2020;34(6):79–83. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10615

37. Amerkhanov Kh. A., Koldayeva E. M. Problems of preserving breed diversity of farm animals in the Russian Federation. *Izvestiya Mezhdunarodnoy akademii agrarnogo obrazovaniya* = Izvestia MAAO. 2023;(65):158–161. (In Russ.). URL: http://maaorus.ru/assets/files/journals/izvestiya-maao-vypusk-65.pdf#page=158

38. Kalashnikov V. V., Zaytsev A. M., Lebedeva L. F. Genetic resources of russian horse breeding and biotechnological methods of their conservation. *Konevodstvo i konny sport* = Horse Breeding and Equestrian Sports. 2024;(3):4–9. (In Russ.). URL: DOI: https://doi.org/10.25727/HS.2024.3.60837

39. Babenkov V. Yu., Chimidova N. V., Khakhlinov A. I., Ubushiyeva A. V., Manzhiyev V. I. The role of reproductive biotechnologies in the reproduction and preservation of the gene pool of rare and endangered breeds of cattle. *Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo* = Animal Husbandry and Fodder Production. 2023;106(1):67–76. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50753393

40. Stolpovsky Yu. A., Zakharov-Gezekhus I. A. The problem of conservation of gene pools of domesticated animals. *Vavilovsky zhurnal genetiki i selektsii* = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2017;21(4):477–486. (In Russ.). URL: DOI: https://doi.org/10.18699/VJ17.266

41. Ulimbashev M. B., Kulintsev V. V., Selionova M. I., Ulimbasheva R. A., Abilov B. T., Alagirova Zh. T. Rational management of the gene pool of valuable breeds of animals for the purpose of conservation of biological diversity. *Yug Rossii: ekologiya, razvitiye* = South of Russia: ecology, development. 2018;13(2):165–183. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.18470/1992-1098-2018-2-165-183

42. Stolpovsky Yu. A., Beketov S. V., Solodneva E. V., Kuznetsov S. B. Conservation of genetic resources of farm animals. *Glavny zootekhnik* = Head of Animal Breeding. 2024;(3):3–18. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.33920/sel-03-2403-01

43. Alpeeva E. V., Sharova N. P., Sharov K. S., Vorotelyak E. A. Russian biodiversity collections: A professional opinion survey. Animals. 2023;13(24):3777. DOI: https://doi.org/10.3390/ani13243777

44. Milovanov V. K. Biology of reproduction and artificial insemination of animals. Moscow: *Izd-vo s.-kh. literaturi, zhurnalov i plakatov*, 1962. 696 p.

45. Koshkina O., Deniskova T., Dotsev A., Kunz E., Selionova M., Medugorac I., Zinovieva N. Phylogenetic analysis of Russian native sheep breeds based on mtDNA sequences. Genes. 2023;14(9):1701.
DOI: https://doi.org/10.3390/genes14091701

46. Bagirov V. A., Zinovyeva N. A. The current state and world experience in the conservation of genetic resources of farm animals. *Uspekhi nauk o zhivotnikh* = Ernst Journal of Animal Science. 2024;(1):5–24. (In Russ.).
URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82336444

47. Aibazov M. M., Mamontova T. V. The creation of bio-resource collections is the necessary condition for conservation and rational use of animal genetic resources. *Selskokhozyaystvenny zhurnal*. 2018;2(11):54–62. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.25930/47pm-n875

48. Gulov A. N., Berezin A. S., Larkina E. O., Saltykova E. S., Kaskinova M. D. Creation of a Biobank of the Sperm of the Honey Bee Drones of Different Subspecies of *Apis mellifera* L. Animals 2023;13(23):3684.
DOI: https://doi.org/10.3390/ani13233684

49. Zinovyeva N. A., Fisinin V. I., Bagirov V. A., Kostyunina O. V., Gladir E. A. Bioresource centers as a form for conservation of animal genetic resources of agricultural purpose. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2013;(11):40–41. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20678305

Вклад авторов: Чубукова О. В. – концепция и план исследования, анализ данных, подготовка рукописи; Хакимова Л. Р. – концепция и план исследования, поиск научной информации, анализ данных; Вершинина З. Р., Михайлова Е. В. – анализ данных, отбор научной информации; Карунас А. С., Хуснутдинова Э. К., Гусев О. А. – концепция и план исследования.

Сведения об авторах

✉ **Чубукова Ольга Вячеславовна,** кандидат биол. наук, научный сотрудник, Институт биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение ФГБНУ Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, пр-кт Октября, д. 71, г. Уфа, Российская Федерация, 450054, e-mail: molgen@anrb.ru,
ORCID: **https://orcid.org/0000-0001-7553-9527**, e-mail: chubukova@bk.ru

Хакимова Лилия Ралисовна, кандидат биол. наук, научный сотрудник, Институт биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение ФГБНУ Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, пр-кт Октября, д. 71, г. Уфа, Российская Федерация, 450054, e-mail: molgen@anrb.ru,
ORCID: **https://orcid.org/0000-0003-0979-0283**

Вершинина Зиля Рифовна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник, Институт биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение ФГБНУ Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, пр-кт Октября, д. 71, г. Уфа, Российская Федерация, 450054, e-mail: molgen@anrb.ru,
ORCID: **https://orcid.org/0000-0001-5480-5320**

Михайлова Елена Владимировна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник, Институт биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение ФГБНУ Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, пр-кт Октября, д. 71, г. Уфа, Российская Федерация, 450054, e-mail: molgen@anrb.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0001-7374-8405**

Карунас Александра Станиславовна, доктор биол. наук, кандидат мед. наук, и.о. директора, Институт биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение ФГБНУ Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, пр-кт Октября, д. 71, г. Уфа, Российская Федерация, 450054, e-mail: molgen@anrb.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0002-2570-0789**

Хуснутдинова Эльза Камилевна, доктор биол. наук, научный руководитель, Институт биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение ФГБНУ Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, пр-кт Октября, д. 71, г. Уфа, Российская Федерация, 450054, e-mail: molgen@anrb.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0003-2987-3334**

Гусев Олег Александрович, кандидат биол. наук, заведующий лаборатории геномных и пост-геномных технологий в животноводстве, Институт биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение ФГБНУ Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, пр-кт Октября, д.71, г. Уфа, Российская Федерация, 450054, e-mail: molgen@anrb.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0002-6203-9758**

Author contributions: Chubukova O. V. – research concept and plan, data analysis, manuscript preparation; Khakimova L. R. – research concept and plan, search for scientific information, data analysis; Vershchinina Z. R., Mikhailova E. V. – data analysis, selection of scientific information; Karunas A. S., Khusnutdinova E. K., Gusev O. A. – research concept and plan.

Information about the authors

✉ **Olga V. Chubukova,** PhD in Biology, researcher, Institute of Biochemistry and Genetics – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, pr-kt Oktyabrya, 71, Ufa, Russian Federation, 450054, e-mail: molgen@anrb.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0001-7553-9527**, e-mail: chubukova@bk.ru

Liliya R. Khakimova, PhD in Biology, researcher, Institute of Biochemistry and Genetics – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, pr-kt Oktyabrya, 71, Ufa, Russian Federation, 450054, e-mail: molgen@anrb.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0003-0979-0283**

Zilya R. Vershinina, PhD in Biology, senior researcher, Institute of Biochemistry and Genetics – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, pr-kt Oktyabrya, 71, Ufa, Russian Federation, 450054, e-mail: molgen@anrb.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0001-5480-5320**

Elena V. Mikhailova, PhD in Biology, senior researcher, Institute of Biochemistry and Genetics – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, pr-kt Oktyabrya, 71, Ufa, Russian Federation, 450054, e-mail: molgen@anrb.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0001-7374-8405**

Alexandra S. Karunas, DSc in Biology, PhD of Medical Sciences, acting director, Institute of Biochemistry and Genetics – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, pr-kt Oktyabrya, 71, Ufa, Russian Federation, 450054, e-mail: molgen@anrb.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0002-2570-0789**

Elza K. Khusnutdinova, DSc in Biology, scientific supervisor, Institute of Biochemistry and Genetics – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, pr-kt Oktyabrya, 71, Ufa, Russian Federation, 450054, e-mail: molgen@anrb.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0003-2987-3334**

Oleg A. Gusev, PhD in Biology, Head of the Laboratory of Genomic and Post Genomic Technologies in Livestock Farming, Institute of Biochemistry and Genetics – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, pr-kt Oktyabrya, 71, Ufa, Russian Federation, 450054, e-mail: molgen@anrb.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0002-6203-9758**

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.272–288
УДК 636.5.033

(cc) BY

Характеристика генов и их экспрессия, ассоциированная с ростовыми показателями цыплят-бройлеров под действием различных кормовых добавок (обзор)

© 2026. Е. А. Сизова, К. С. Нечитайло, К. В. Рязанцева, Д. Е. Шошин, Т. А. Семынин✉, А. С. Бардакова
ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук», г. Оренбург, Российская Федерация

Для производства мяса птицы необходимы высокопродуктивные кроссы, поэтому идентификация и степень проявления генов, вовлеченных в формирование продуктивных признаков цыплят-бройлеров, являются важным шагом на пути к увеличению выхода мяса и улучшению его качества. Изучение генов, отвечающих за ростовые показатели, позволит повысить скороспелость птицы и снизить затраты на корма и обслуживание. В данном обзоре проведён поиск и изучение ряда генов, участвующих в формировании мышечной и жировой ткани, а также генов, регулирующих транспорт нутриентов у цыплят-бройлеров, что, в свою очередь, является важной составляющей для производства достаточного количества мяса птицы. В ходе изучения литературных данных было выяснено, что за формирование мышечной ткани отвечает перечень генов, таких как GH, MYOG, MYOD, MSTN, IGF-1, FGF2, влияющих непосредственно на показатели роста у цыплят-бройлеров. За формирование жировой ткани отвечают гены – LEP, AdipoQ, FABP2, ACACA, PPARA, FASN. Транспорт нутриентов, необходимых для нормального роста тканей и организма в целом, контролирует группа генов – SLC2A1, SLC2A2, SLC2A3, SLC7A1, SLC7A2, SLC7A5, SLC7A6, SLC7A7, SLC38A2. Проведенный анализ литературных данных показал, что использование кормовых добавок, имеющих в составе фитобиотики, пребиотики, пробиотики и синбиотики влияет на активность генов. Это способствует формированию мышечной массы, позволяет поддержать физиологическое состояние птицы, предотвратить развитие заболеваний, ускорить темпы роста и повысить продуктивность бройлеров.

Ключевые слова: *продуктивность, птицеводство, проявление признаков, миогенез, липогенез, мышечная ткань, Gallus Gallus, кормовой фактор*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук» (тема № FNWZ-2024-0002).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Сизова Е. А., Нечитайло К. С., Рязанцева К. В., Шошин Д. Е., Семынин Т. А., Бардакова А. С. Характеристика генов и их экспрессия, ассоциированная с ростовыми показателями цыплят-бройлеров под действием различных кормовых добавок (обзор). Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):272–288.
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.272-288

Поступила в редакцию: 17.04.2025 Принята к публикации: 30.03.2026
Доработана после рецензирования: 09.06.2025 Опубликована онлайн: 27.04.2026

Characteristics of genes and their expression associated with the growth rates of broiler chickens under the influence of various feed additives (review)

© 2026. Elena A. Sizova, Ksenia S. Nechitailo, Kristina V. Ryazantseva, Daniil E. Shoshin, Timofey A. Semynin✉, Alexandra S. Bardakova
Federal Research Centre of Biological Systems and Agro-technologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russian Federation

Highly productive crosses are necessary for the production of poultry meat, therefore, the identification and degree of manifestation of the genes involved in the formation of productive traits of broiler chickens is an important step towards increasing meat yield and improving its quality. The study of the genes responsible for growth indicators will increase the bird precocity and reduce feed and maintenance costs. This review searches for and studies a number of genes involved in the formation of muscle and fat tissue, as well as genes regulating nutrient transport in broiler chickens, which, in turn, is an important component for the production of sufficient quantities of poultry meat. During the study of literature data, it was found out that such genes as GH, MYOG, MYOD, MSTN, IGF-1, FGF2 are responsible for muscle tissue formation, these are the main genes that directly affect growth performance in broiler chickens. For the formation of adipose tissue, such genes as LEP, AdipoQ, FABP2, ACACA, PPARA, FASN are responsible. A number of genes such as SLC2A1, SLC2A2, SLC2A2, SLC2A3, SLC7A1, SLC7A2, SLC7A5, SLC7A6, SLC7A7, and SLC38A2 are responsible for the transport of nutri-

ents required for normal growth of tissues and the body as a whole. Literature data analysis has shown that the use of feed additives with the addition of phytobiotics, prebiotics, probiotics and synbiotics, affects the activity of genes. This contributes to the formation of muscle mass, lets support the physiological state of the bird, prevent the development of diseases, accelerate the growth rate and increase the productivity of broilers.

Key words: *productivity, poultry farming, manifestation of traits, myogenesis, lipogenesis, muscle tissue, Gallus Gallus, feed factor*

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of Federal Research Centre of Biological Systems and Agro-technologies of the Russian Academy of Sciences (theme No. FNWZ-2024-0002).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors stated no conflict of interest.

For citation: Sizova E. A., Nechitailo K. S., Ryazantseva K. V., Shoshin D. E., Semynin T. A., Bardakova A. S. Characteristics of genes and their expression associated with the growth rates of broiler chickens under the influence of various feed additives (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):272–288. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.272-288

Received: 17.04.2025
Revised: 09.06.2025
Accepted for publication: 30.03.2026
Published online: 27.04.2026

Экспрессия генов жизненно важный клеточный процесс реализации наследственной информации, благодаря которому ген проявляет свой потенциал в конкретном фенотипическом признаке организма[1] [1].

Фундаментальной единицей ДНК является ген. Вся генетическая информация об организме закодирована в виде нуклеотидов. Гены состоят из ДНК, которая представляет собой длинную нить нуклеотидных мономеров. Фосфатная группа, пентоза (дезоксирибоза) и одно из азотистых оснований – аденин (А), тимин (Т), цитозин (С) или гуанин (Г) – составляют эти мономеры. В состав гена входят четыре нуклеотида[2] [2].

Гены экспрессируются только тогда, когда это необходимо, и экспрессия генов регулируется определенными факторами. Экспериментальные исследования показали, что ген, несущий информацию, не активен все время и может быть активирован или деактивирован как в прокариотических, так и эукариотических организмах. Каждая черта живого организма определяется генами, которые формируют различные признаки, такие как рост, цвет глаз, волос и кожи, группу крови и генетические аномалии[3] [3].

Первое упоминание «*gene expression*» в базе данных PubMed датируется 1946 г., при этом по запросу «*gene expression*» во временном диапазоне с 1946 по 2025 г. система выдает 1817697 результатов. За последние 30 лет с 1995 по 2025 г. количество исследований, посвященных теме «*gene expression*», выросло почти в 4 раза (рис. 1).

Таким образом, с каждым годом мы наблюдаем экспоненциальный рост научных публикаций по теме экспрессии генов, и растущий интерес к генетическим исследованиям.

Применение генетических методов исследования позволяет более точно оценить на молекулярном уровне влияние паратипических факторов на процессы, определяющие формирование фенотипов животных, в первую очередь продуктивности и их устойчивости к неблагоприятным факторам [4]. Изучая транскрипционную активность отдельных генов или всего транскриптома в целом, можно выявить специфические биологически активные свойства нутрицевтиков и ингредиентов кормов, которые могут быть скрыты при оценке фенотипа [5]. Например, ранее изучалась экспрессия генов у сельскохозяйственной птицы, связанных с такими признаками, как:

- инициация воспаления;
- апоптоз;
- антимикробная и противовирусная активность;
- миогенез в период эмбрионального развития;
- устойчивость к токсическим и лекарственным веществам;
- антиоксидантная защита, адаптация к тепловому стрессу.

[1]Цаценко Л. В. Генетика: курс лекций. Краснодар: КубГАУ, 2015. 31 с.
[2]Gene – Structure, Types & Characteristics [Электронный ресурс].
URL: https://www.geeksforgeeks.org/gene/?ysclid=m840mubdu7401442867/ (дата обращения: 11.03.25).
[3]Фомченко Н. Е., Фадеева И. В. Экспрессия генов прокариот и эукариот: учебно-методическое пособие для студентов 1 курса всех факультетов медицинских вузов. Гомель: ГомГМУ, 2016. 32 с.

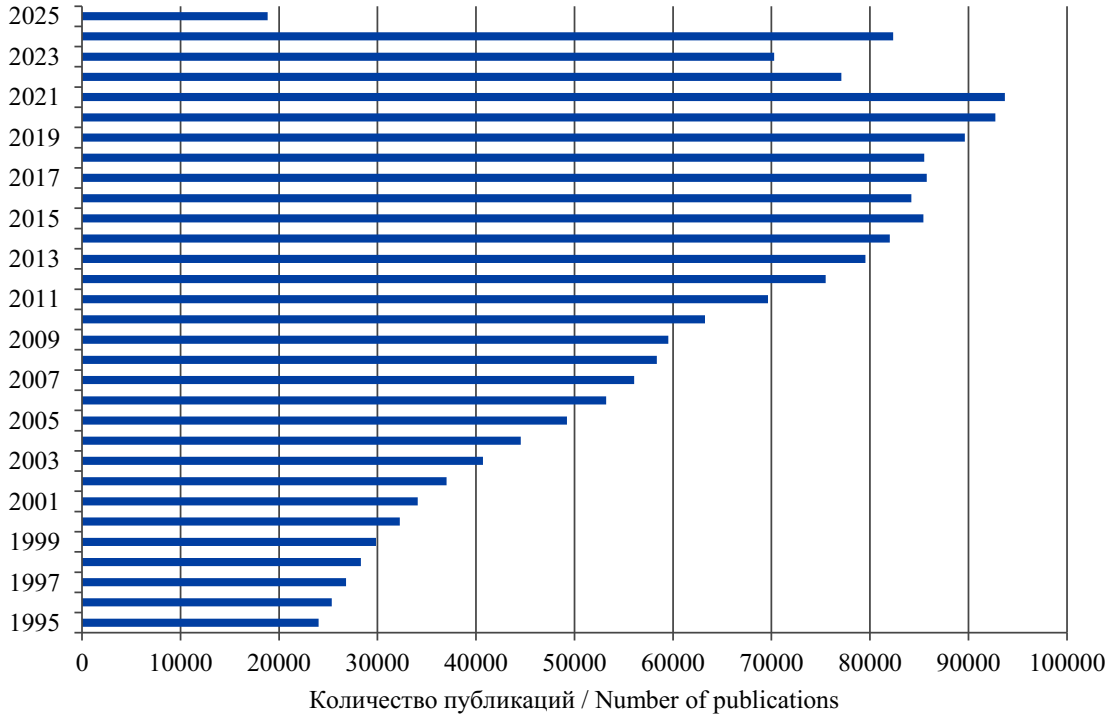


Рис. 1. **Количество научных статей, опубликованных по ключевому запросу «*gene expression*» в базе данных PubMed с 1995 по 2025 г. /**

Fig. 1. **The number of scientific articles published on the «*gene expression*» key query in the PubMed database from 1995 to 2025**

Тепловой стресс – одно из самых негативных явлений в жизни сельскохозяйственных животных. Птицы, подвергшиеся хроническому тепловому стрессу, теряют запасы гликогена в мышцах, что приводит к получению темного, плотного и сухого мяса [6].

Однако влияние уровня транскрипционной активности целевых генов, определяемое воздействием питательных и биологически активных веществ рациона на формирование хозяйственно полезных и биологических признаков изучено недостаточно [7, 8]. Более того, для птицеводства особый интерес представляют гены, связанные с ростом, мясной продуктивностью, устойчивостью к неблагоприятным факторам, что и определяет актуальность данного исследования. Исходя из вышеизложенного, поиск литературных данных по видам генов, отвечающих за показатели продуктивности цыплят-бройлеров, а именно скорость роста мышечной, жировой и костной ткани, является актуальным.

Цель обзора – провести анализ литературных данных, отражающих перечень и экспрессию генов, ассоциированных с ростовыми показателями мышечной и жировой тканей, отвечающих за транспорт веществ, необходимых для оптимального продуктивного эффекта цыплят-бройлеров при применении кормовых добавок различного функционала, в том числе в комбинации с фитобиотическими, пробиотическими, пребиотическими и синбиотическими компонентами.

Материал и методы. Рассмотренные источники научной литературы включают отечественных и зарубежных авторов. Они посвящены исследованиям в области применения молекулярно-генетических методов, необходимых для анализа уровня экспрессии генов, связанных с ростовыми показателями различных тканей, а также с усвоением питательных веществ у сельскохозяйственной птицы. Поиск осуществляли по следующим ключевым словам: продуктивность, птицеводство, проявление признаков, миогенез, липогенез, мышечная ткань, *Gallus Gallus*, кормовой фактор. Критерий включения публикаций в обзорную статью – работы, изданные преимущественно за последние 10-15 лет, а также исследования по ключевым генам (*GH, MYOG, LEP, FASN* и другие). Исключались статьи без доступа к полному тексту. Весь поиск литературных данных и научных статей осуществляли с помощью мониторинга международных и российских электронных библиотечных систем: eLIBRARY.RU, PubMed, Cyberleninka, Web of Science, Master Journal List, Elsevier.

Основная часть. *Миогенез. Гены, ассоциированные с ростом мышечной ткани*. За формирование скелетной мышечной ткани, особенно в процессе эмбриогенеза, отвечает миогенез. Если углубиться в литературу, то миогенез – это сложный, точно регулируемый процесс развития скелетной мышечной ткани, начинающийся во время эмбрионального развития с формирования мышечных клеток-предшественников из мезодермы, который контролируется специфическими транскрипционными факторами MYF5, MYOD, MRF4, PAX7 и PAX3. Миобласты пролиферируют, а затем сливаются вместе, образуя многоядерные миоциты, которые в дальнейшем развиваются в зрелые мышечные волокна [9].

Сателлитные клетки остаются неподвижными во время нормального мышечного гомеостаза, но могут быть активированы для пролиферации и дифференцировки, что способствует росту и восстановлению мышц [10]. Экспрессия миогенных регуляторных факторов (MRF), таких как MYOD и MYOG, управляет поэтапной дифференцировкой миобластов в функциональные мышечные волокна, которая происходит в 3 стадии (рис. 2):

- первая стадия – завершение клеточного цикла и начало экспрессии определенных генов;
- вторая стадия – выравнивание миобластов друг с другом;
- третья стадия – это собственно слияние клеток. На этом этапе решающее значение имеет наличие ионов кальция.

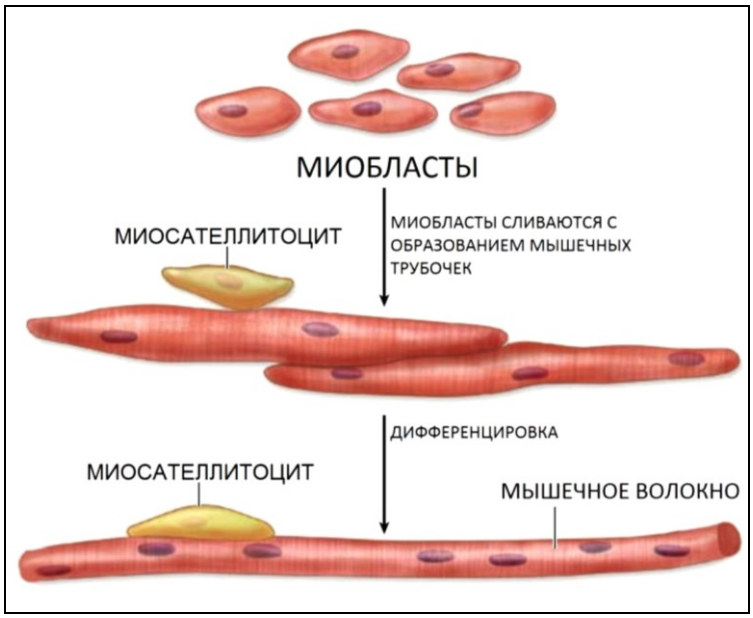


Рис. 2. **Схема развития скелетной мышцы[4] /**
Fig. 2. **Skeletal muscle development scheme[4]**

Слияние включает в себя присоединение актина к плазматической мембране, за которым следует плотное прилегание и создание поры, которая впоследствии быстро расширяется [11].

Определение уровня экспрессии генов, отвечающих за ростовые показатели сельскохозяйственной птицы, необходимо для отбора особей с желаемыми показателями, такими как высокая скорость роста и живая масса. Перечень генов, ассоциированных с ростовыми показателями скелетной мышечной ткани, представлен в таблице 1.

Соматотропин (СТГ) или гормон роста – это белок, состоящий из 191 аминокислоты, который кодируется геном *GN*. Данный белок секретируется передней долей гипофиза и является стимулятором роста костной и хрящевой тканей и внутренних органов. Соматотропин, имея рецепторы на клетках печени, способен стимулировать образование соматомединов – белковых соединений, через которые СТГ способен регулировать ростовые действия всех тканей. Существует 7 типов соматомединов: A1, A2, B1, B2, B3, B4, C[5].

[4]Бурганова Г. Р., Плюшкина А. С., Андреева Д. И., Гумерова А. А., Киясов А. П. Мышечная ткань: учебно-методическое пособие. Казань, 2018. 44 с.
URL: https://kpfu.ru/portal/docs/F_510699241/Uch_met.posobie.Myshechnaya.tkan._2018_.pdf
[5]Шушкевич Н. И. Биохимия гормонов: учебное пособие по медицинской биохимии. Владимир: изд-во Владимирского ГУ, 2009. 68 с.

Таблица 1 – **Гены, ассоциированные с ростом скелетной мышечной ткани /**
Table 1 – **Genes associated with skeletal muscle tissue growth**

Ген / Gene	*Белок / Protein*	*Функция / Function*	*Материал для исследования / Research material*	*Ссылка / Reference*
GH	Соматотропин / Somatotropin	Эмбриональный и постэмбриональный рост тканей / Embryonic and postembryonic tissue growth	Передняя доля гипофиза, печень / Anterior pituitary gland, liver	[12, 13]
MYOG	Миогенин / Myogenin	Развитие скелетных мышц / Skeletal muscle development	Скелетные мышцы / Skeletal muscles	[14]
MYOD1	Фактор миогенной дифференцировки 1 / Myogenic differentiation factor 1	Развитие скелетных мышц / Skeletal muscle development	Скелетные мышцы / Skeletal muscles	[15]
MSTN	Миостатин или фактор дифференциации 8 / Myostatin or differentiation factor 8	Подавление роста и дифференцировки мышечной ткани / Inhibition of muscle growth and differentiation	Скелетные мышцы / Skeletal muscles	[16, 17, 18, 19]
TGF-beta	Миостатин, новый член суперсемейства TGF-бета / Myostatin, a new member of the TGF-beta superfamily	Негативный регулятор роста скелетных мышц у животных / Negative regulator of skeletal muscle growth in animals	Скелетные мышцы / Skeletal muscles	[20]
IGF-1	Инсулинподобный фактор роста 1 / Insulin-like growth factor 1	Стимулирует развитие костей и тканей / Stimulates bone and tissue development	Печень, скелетные мышцы / Liver, skeletal muscles	[21, 22, 23]
FGF2	Фактор роста фибробластов 2 / Fibroblast growth factor 2	Играет важную роль в регуляции роста и развития клеток мышечной и костной ткани / Plays an important role in regulating the growth and development of muscle and bone tissue cells.	Мышечная, хрящевая ткани / Muscle, cartilage tissue	[24]
PAX3	Транскрипционный фактор 3 / Transcription factor 3	Формирования скелетных мышц в эмбриональный период / Skeletal muscle formation in the embryonic period	Скелетные мышцы / Skeletal muscles	[25]
PAX7	Транскрипционный фактор 7 / Transcription factor 7	Регенерации мышечной ткани в постэмбриональный период / Regeneration of muscle tissue in the postembryonic period	Скелетные мышцы / Skeletal muscles	

Соматомедины типа А усиливают деление клеток хрящевой ткани, синтез ДНК, РНК, белка и коллагена. Соматомедины типа В стимулируют синтез ДНК и белка в клетках нервной ткани. Соматомедины типа С действуют на жировую и мышечную ткани, где стимулируют поглощение ими глюкозы и тормозят липолиз в жировой ткани, активируют синтез глюкозы в печени из веществ неуглеводной природы [12].

Развитие скелетных мышц определяется в основном пролиферацией и дифференциацией миобластов, которые являются предшественниками мышечных клеток. Миогенные регуляторные факторы и стимуляторы роста имеют решающее значение для развития мышц у сельскохозяйственных животных [13]. Белки миогенных регуляторных факторов и фактора миоцитарного энхансера 2 (MEF2) являются ключевыми факторами транскрипции, которые положительно участвуют в регуляции развития скелетных мышц. Семейство факторов транскрипции MRF состоит из группы основных спирально-петлево-спиральных белков: миогенный фактор дифференцировки 1 (MyoD1); миогенный фактор 5 (Myf5); миогенин и MRF4. Семейство MEF2 состоит из четырех членов – MEF2A, B, C и D. С другой стороны, миостатин (MSTN), член суперсемейства трансформирующего фактора роста β (TGF-β), секретируемого скелетными мышцами, действует как мощный отрицательный регулятор дифференцировки и роста мышц [14].

На экспрессию генов, участвующих в развитии мышц, существенное влияние оказывают миостатин и миогенин, два важнейших регулятора миогенеза. Взаимодействие между этими факторами имеет решающее значение для понимания дифференциации и роста мышц.

Известно, что *MYOG* – это ген, кодирующий белок миогенин, относящийся к семейству миогенных регуляторных факторов, связанных с пролиферацией и дифференцировкой миобластов и обеспечивающих рост и развитие скелетных мышц у животных, в том числе в постнатальном периоде онтогенеза. Способствует развитию генов антимикробной (*Gal9, Gal10*) и противовирусной защиты (*IRF7*), а также противовоспалительных генов *IL6* и *IL8* [15].

Миостатин – это белок, который кодируется геном *MSTN*, относится к суперсемейству трансформирующих факторов роста TGF-β. Он экспрессируется клетками скелетных мышц животных и человека, основная функция – ограничение роста и дифференцировки мышечных клеток. Мутации в этом гене приводят к гиперплазии мышечных волокон в эмбриональном периоде и их гипертрофии в постэмбриональных периодах онтогенеза [16].

Миостатин более распространен в скелетных мышцах с преобладающим гликолитическим метаболизмом, чем в мышцах с преобладающим окислительным метаболизмом. В меньших концентрациях он обнаруживается в сердце и жировой ткани. Как и другие белки этого семейства, он синтезируется на рибосомах шероховатой эндоплазматической сети в виде белка-предшественника [17].

Помимо того, что миостатин у кур играет важную роль в контроле роста и дифференциации скелетных мышц, данный белок также может участвовать в регуляции роста жировой ткани [18]. Миостатин, называемый фактором дифференциации роста 8 (GDF 8), отрицательный регулятор роста у кур, был охарактеризован на уровне нуклеотидов и белков. Миостатин является перспективной молекулой, связанной с контролем роста у кур, которую можно рассматривать для определения генетических маркеров роста и других экономически важных признаков для дальнейшего использования в селекционной программе, а также для быстрого улучшения признаков роста путем подавления его экспрессии с помощью РНК-интерференции и редактирования генов у птицы [19, 20].

IGF-1 (инсулиноподобный фактор роста 1) – отвечает за рост скелетной мышечной ткани, отложение жира, формирование тушки и качество мяса у кур [21]. Рецептор инсулиноподобного фактора роста 1 (IGF1 R) представляет собой мембранный гликопротеин, опосредующий большинство биологических активностей IGF-1 и IGF-2, которые оказывают важное влияние на рост цыплят, характеристики тушки и качества мяса. Два рецептора (IGF1R и IGF2R) были обнаружены у млекопитающих, но только один (IGF1R) был выявлен у птиц [22]. *IGF-1* стимулирует пролиферацию и дифференциацию миобластов – клеток-предшественников мышечных волокон. Это приводит к росту мышечной массы и улучшению качества мяса. Данный ген регулирует рост и развитие костной системы, способствуя минерализации и укреплению костной ткани, что особенно важно для быстрорастущих пород птицы. Генетические особенности породы могут влиять на уровень синтеза *IGF-1* [23].

FGF2 – фактор роста фибробластов 2, представляет собой белок, который кодируется одноименным геном и играет важную роль в регуляции роста и развития клеток мышечной и костной ткани. В контексте продуктивности бройлеров FGF2 имеет значительное влияние на такие показатели, как скорость роста, масса тела и качество мяса. Данный белок отвечает за стимуляцию роста мышечной ткани, развитие костной ткани, образование новых кровеносных сосудов и нормальное заживление ран. Экспрессия этого гена необходима для правильного построения мышечных волокон в эмбриональном периоде [24].

PAX3 и PAX7 – это транскрипционные факторы, которые выполняют важную роль в развитии тканей. PAX3 регулирует нервный ствол и, вместе со своим гомологичным PAX7, также экспрессируется в некоторых частях центральной нервной системы. Оба фактора являются ключевыми регуляторами миогенеза, где PAX3 играет важную роль во время раннего формирования скелетных мышц у эмбриона, в то время как PAX7 преобладает во время постнатального развития и регенерации мышц у взрослого организма [25].

Липогенез. Гены, ассоциированные с ростом жировой ткани. Исследования кур (*Gallus Gallus*) оказали значительное влияние на фундаментальную биологию. За последние 80 лет селекционное разведение

достигло впечатляющего прогресса в показателях как яичной, так и мясной продуктивности. Современный коммерческий бройлер является продуктом интенсивного отбора, направленного на быстрый рост и увеличение мышечной массы на протяжении многих поколений. С этими успехами связано множество нежелательных признаков, таких как асцит и хромота, снижение плодовитости и устойчивости к инфекционным заболеваниям. Отбор на быстрый рост также сопровождался повышенным отложением жира у этих животных. Избыточный жир является серьезной проблемой для современной бройлерной промышленности, поскольку он снижает выход мяса с туши, что в свою очередь понижает эффективность использования кормов. Кроме того, избыточный жир отталкивает потребителей и создаёт дополнительные трудности в процессе переработки [26].

Липогенез – это процесс синтеза липидов из избытков глюкозы для последующего метаболического использования[6]. Благодаря липогенезу синтезируются триглицериды, которые запасают энергию в виде жировой ткани. Если говорить о чувствительности липогенеза к изменениям в рационе, то полиненасыщенные жирные кислоты снижают липогенез, подавляя экспрессию генов в печени, включая синтазы жирных кислот. Диета, богатая углеводами, наоборот, стимулирует липогенез как в печени, так и жировой ткани, что приводит к повышению уровня триглицеридов в плазме после приема пищи. Голодание снижает липогенез в жировой ткани, что в сочетании с повышенной скоростью липолиза приводит к чистой потере триглицеридов из жировых клеток.

Накопление жира определяется балансом между его синтезом и расщеплением (липолиз). Липогенез включает процессы синтеза жирных кислот и последующего синтеза триглицеридов и происходит как в печени, так и жировой ткани (рис. 3) [27].

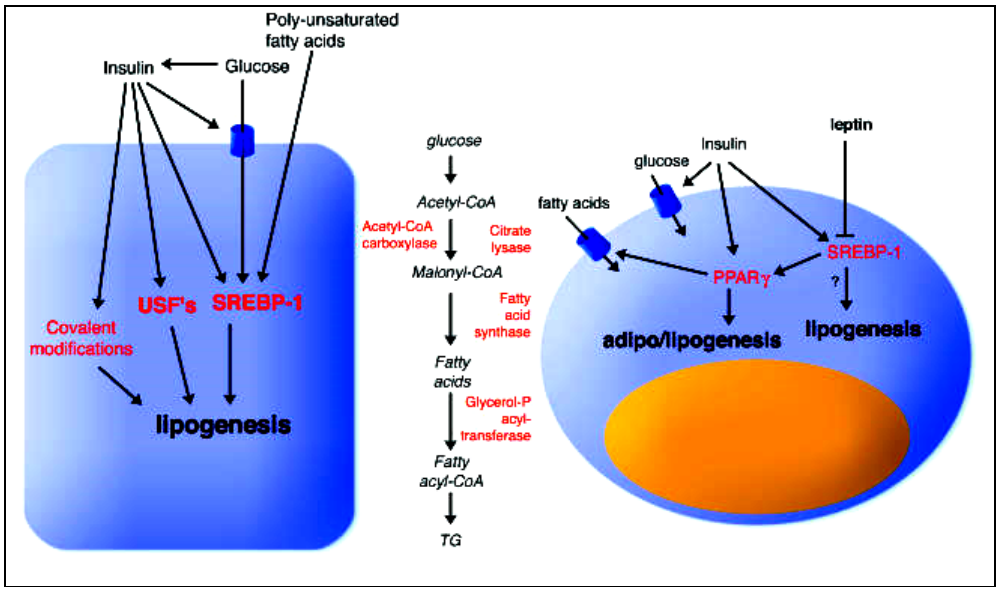


Рис. 3. **Регуляция липогенеза в гепатоцитах (слева) и адипоцитах (справа)** [27] /
Fig. 3. **Regulation of lipogenesis in hepatocytes (left) and adipocytes (right)** [27]

Формирование жировой ткани у сельскохозяйственной птицы контролируется множеством генов, связанных с метаболизмом липидов и энергетическим обменом. Гены работают в комплексе, влияя на различные аспекты липидного обмена, включая синтез, транспортировку и хранение жиров. Понимание генетической основы жирообразования важно для селекции бройлеров с оптимальными характеристиками мяса и продуктивности. Перечень генов, ассоциированных с ростом жировой ткани у цыплят-бройлеров, представлен в таблице 2.

[6]Lipogenesis [Электронный ресурс]. URL: https://www.biologyonline.com/dictionary/lipogenesis/ (дата обращения: 12.03.25).

Таблица 2 – **Гены, ассоциированные с ростом жировой ткани у цыплят-бройлеров /**
Table 2 – **Genes associated with adipose tissue growth in broiler chickens**

Ген / Gene	*Белок / Protein*	*Функция / Function*	*Материал для исследования / Research material*	*Ссылка / Reference*
LEP	Лептин / Leptin	Регуляция энергетического обмена и нормализация чувства голода / Regulation of energy metabolism and normalization of hunger	Венозная кровь / Venous blood	[28, 29]
AdipoQ	Адипонектин / Adiponectin	Поддержка уровня глюкозы, расщепление жирных кислот / Glucose level support, fatty acid breakdown	Сыворотка крови, мышечная ткань / Blood serum, muscle tissue	[30]
FABP2	Белок, связывающий жирные кислоты 2 / Fatty acid binding protein 2	Синтез богатых триглицеридами липопротеинов / Synthesis of triglyceride-rich lipoproteins.	Цельная кровь, тонкий кишечник / Whole blood, small intestine	[31]
ACACA	Ацетил-КоА-карбоксилаза / Acetyl-CoA carboxylase	Синтез жирных кислот / Synthesis of fatty acids	Печень, жировая ткань / Liver, adipose tissue	[32]
PPARα	Транскрипционный фактор / The transcription factor	Регулировка дифференцировки адипоцитов / Regulation of adipocyte differentiation	Печень, жировая ткань, почки / Liver, adipose tissue, kidneys	[33]
FASN	Синтаза жирных кислот / Fatty acid synthase	Синтез жирных кислот, регуляция энергетического баланса / Synthesis of fatty acids, regulation of energy balance	Печень, жировая ткань / Liver, adipose tissue	[34, 35]

Лептин – это белок, кодируемый геном *LEP*, участвует в регуляции потребления пищи и энергетического баланса у млекопитающих. Несмотря на текущие споры о существовании гена лептина в геноме курицы, существование лептиноподобного иммунореактивного вещества и функционального рецептора лептина (LEPR) было подтверждено [28]. Кроме того, экзогенный мышиный или человеческий лептин оказывает на домашнюю птицу такое же воздействие, как и на млекопитающих. Лептин в основном секретируется жировой тканью млекопитающих, оказывая прямое влияние на липолиз и липогенез жировой ткани. У птиц печень является основным источником лептина и основным органом для липогенеза [29].

Адипонектин – это гормон, кодируемый геном *AdipoQ*, который влияет на утилизацию глюкозы, чувствительность к инсулину и энергетический гомеостаз. Учёными из Китая было проведено исследование влияния адипонектина на отложение липидов у бройлеров. Для лечения птицы использовались росиглитазон и дексаметазон. Всего 120 23-дневных самцов бройлеров кросса Кобб были случайным образом разделены на 3 группы для 3 недель лечения. Был установлен уровень адипонектина в сыворотке крови и состав жирных кислот в мышцах. Уровни экспрессии адипонектина, рецепторов адипонектина (adipoR1, adipoR2) и генов, связанных с метаболизмом липидов, в мышцах были измерены с помощью ПЦР в реальном времени. Росиглитазон увеличил концентрацию адипонектина в сыворотке крови, уровень экспрессии адипонектина и adipoR1, в то время как дексаметазон показал противоположный эффект. Содержание внутримышечного жира, общее содержание жирных кислот, насыщенных жирных кислот и мононенасыщенных жирных кислот снизилось в группе лечения росиглитазоном. В группе лечения росиглитазоном уровни экспрессии липогенных генов и белков снизились в мышцах, тогда как уровни экспрессии генов липолиза увеличились. Эти результаты показали, что росиглитазон и дексаметазон могут регулировать экспрессию адипонектина в мышцах бройлеров [30].

Биологический механизм отложения абдоминального жира, по-видимому, важен как для понимания ожирения у людей, так и для повышения продуктивности сельскохозяйственных животных. Сокращение отложения абдоминального жира может позволить

значительно повысить эффективность кормления и ценность туши. Белки, связывающие жирные кислоты (FABP), относятся к семейству малых цитоплазматических белков. Считается, что члены семейства FABP играют роль в поглощении, транспорте и метаболизме жирных кислот [31].

Ацетил-коэнзим А карбоксилаза альфа (ACACA) и белок, связывающий жирные кислоты 2 (FABP2), являются ключевыми факторами липогенеза и транспорта. Они могут играть решающую роль в изменчивости веса абдоминальной жировой ткани у растущих цыплят [32].

Рецептор, активируемый пролифератором пероксисом α (PPARα), является лиганд-активируемым фактором транскрипции, который участвует в липидном метаболизме различных тканей. Данный рецептор способствует расщеплению, утилизации и катаболизму жирных кислот путём регуляции генов, участвующих в транспорте, связывании и регуляции жирных кислот. PPARα необходим для процесса кетогенеза и активируется в условиях энергетического голодания [33].

Синтаза жирных кислот (FASN) является ключевым ферментом липогенеза [34]. Следует отметить, что влияние различных факторов питания на экспрессию гена *FASN* у цыплят-бройлеров изучалось в ряде работ. Так, использование эфирных масел черного перца и масла семян редьки в качестве кормовой добавки показало, что экспрессия мРНК гена *FASN* была снижена [35].

Гены, ассоциированные с усвоением питательных веществ. Цыплята-бройлеры характеризуются быстрым ростом и развитием, которые могут быть достигнуты только тогда, когда удовлетворяются потребности животного в энергии и питательных веществах. У цыплят задержка в доступе к корму после вылупления связана с нежелательными последствиями, которые включают снижение показателей роста, неэффективное использование питательных веществ и снижение роста грудных мышц [36]. Эти негативные последствия могут быть частично обусловлены неправильным развитием желудочно-кишечного тракта и иммунной системы. Кроме того, это может привести к преждевременному истощению запасов энергии, поскольку усиление липогенеза в печени не происходит до начала кормления, при этом уровень гликогена снижается у цыплят к началу поедания корма [37].

Главным местом усвоения питательных веществ является тонкий кишечник, так как рост и продуктивность птицы зависит от способности кишечника переваривать и усваивать питательные вещества [38]. За транспорт аминокислот отвечают гены семейства переносчиков растворённых веществ или SLC (*solute carrier family*). В таблице 3 представлен перечень генов, отвечающих за транспорт нутриентов в организме цыплят-бройлеров.

GLUT представляют собой семейство белков-транспортеров глюкозы, которые транспортируют глюкозу двунаправленно через клеточные мембраны путем облегчённой диффузии. Они являются членами семейства переносчиков растворенных веществ 2A (SLC2A). У млекопитающих ген *SLC2A1* кодирует основной белок GLUT гематоэнцефалического барьера. Кодируемый белок расположен в основном вдоль поверхности клетки и в клеточной мембране. GLUT1 может отвечать за конститутивное или базальное поглощение глюкозы в клетках и может транспортировать широкий спектр альдоз, включая пентозу и гексозу [39].

Ген *SLC2A2* кодирует гликопротеин. Кодируемый белок регулирует двунаправленный транспорт глюкозы через клетки печени, β-клетки панкреатических островков, которые хранят и выделяют инсулин, эпителиальные клетки почек и клетки кишечника. Подобно млекопитающим, у кур наблюдается обильная экспрессия GLUT2 в печени, β-клетках поджелудочной железы, почках и тонком кишечнике [40].

GLUT3 млекопитающих облегчает поглощение глюкозы, 2-дезоксиглюкозы, галактозы, маннозы, ксилозы, фукозы и других моносахаридов через клеточную мембрану и кодируется геном *SLC2A3*. Известно, что GLUT3 кур является нейрональным переносчиком глюкозы и имеет 70 % сходства с последовательностью человека [41]. Нейрональные функции GLUT1 и GLUT3 схожи у кур и млекопитающих. У кур повышение регуляции GLUT1 и GLUT3 связано с образованием плотных соединений в гематоэнцефалическом барьере [42].

GLUT4 присутствует почти исключительно в чувствительных к инсулину тканях, таких как мышечная и жировая ткань, является чувствительным к инсулину транспортером глюкозы, ответственным за быстрый транспорт глюкозы после стимуляции инсулина у млекопитающих [43].

Таблица 3 – **Гены, ассоциированные с транспортом нутриентов в организме цыплят-бройлеров** / *Table 3* – **Genes associated with nutrient transport in broiler chickens**

Ген / Gene	*Белок / Protein*	*Функция / Function*	*Материал для исследования / Research material*	*Ссылка / Reference*
SLC2A1	Переносчик гексоз GLUT1 / The GLUT1 hexose transporter	Транспорт глюкозы, фруктозы, галктозы, петнозы, гексозы / Transport of glucose, fructose, galactose, pentose, hexose	Тонкий кишечник, скелетные мышцы, печень / Small intestine, skeletal muscles, liver	[39]
SLC2A2	Переносчик гексоз GLUT2 / The GLUT2 hexose transporter		Тонкий кишечник, печень / Small intestine, liver	[40]
SLC2A3	Переносчик гексоз GLUT3 / The GLUT3 hexose transporter		Гипоталамус, печень / Hypothalamus, liver	[41, 42]
GLUT	GLUT4 – мембранные белки-транспортеры глюкозы / The GLUT4 membrane proteins – glucose transporters	Быстрый транспорт глюкозы / Rapid transport of glucose	Мышечная и жировая ткань / muscle and fat tissue	[43]
SLC7A1	Переносчик аминокислот CAT1 / The CAT1 amino acid transporter	Транспорт катионных аминокислот / Transport of cationic amino acids	Тонкий кишечник, грудные мышцы / Small intestine, pectoral muscles	[44]
SLC7A2	Переносчик аминокислот CAT2 / The CAT2 amino acid transporter			[45]
SLC7A5	Переносчик аминокислот LAT1 / Amino acid transporter LAT1	Транспорт L-аминокислот / Transport of L-amino acids	Тонкий кишечник, грудные мышцы / Small intestine, pectoral muscles	[46, 47]
SLC7A6	Переносчик аминокислот *y*LAT2 / Amino acid transporter *y*LAT2	Транспорт *y*L-аминокислот / Transport of *y*L-amino acids		
SLC7A7	Переносчик аминокислот LAT3 / Amino acid transporter LAT3			
SLC38A2	Переносчик аминокислот SNAT2 / Amino acid transporter SNAT2	Транспорт нейтральных аминокислот / Transport of neutral amino acids		

Существует несколько транспортеров незаменимых аминокислот, которые не могут быть синтезированы в организме, и аминокислот, которые могут быть использованы в качестве субстратов для глюконеогенеза. К ним относятся натрий-независимые катионные переносчики аминокислот CAT1 и CAT2, кодируемые генами *SLC7A1* и *SLC7A2* соответственно [44, 45]. Большой нейтральный переносчик аминокислот LAT1 и Y + L переносчик аминокислот γLAT2, которые кодируются генами *SLC7A5* и *SLC7A6* соответственно и натрий-связанный нейтральный переносчик аминокислот 2 SNAT2, кодируемый геном *SLC38A2* [46]. В рационе молодых цыплят аминокислоты метионин и лизин являются распространёнными компонентами и транспортируются переносчиками LAT1 и SNAT2 или CAT1, CAT2 и yLAT2 соответственно. По крайней мере, двое из этих транспортеров (LAT1 и SNAT2) активируются у млекопитающих, когда присутствуют повышенные уровни транспортируемых ими субстратов [47].

Влияние использования фитобиотических и пробиотических веществ в качестве кормовых добавок. Значимую роль в поддержании здоровой микрофлоры кишечника цыплят-бройлеров играют такие вещества, как фитобиотики, пробиотики, пребиотики, синбиотики, витамины, ферменты, минеральные вещества и аминокислоты. Эти соединения способствуют росту и развитию птицы, обладают антимикробным эффектом и поддерживают нормальную микрофлору кишечника [48].

Микробиота желудочно-кишечного тракта является ключевым фактором развития и регуляции иммунитета, пищеварения и усвоения питательных веществ у птицы [49]. Микробиота может модулироваться биологически активными веществами, такими как пребиотики, пробиотики или синбиотики [50]. Эти биологически активные соединения могут непосредственно модулировать микробиом кишечника и, следовательно, косвенно влиять на процессы в организме. В таблице 4 представлены примеры веществ, используемых в кормлении сельскохозяйственной птицы.

Таблица 4 – **Фитобиотики, пребиотики и пробиотики, используемые в птицеводстве и их свойства** /
Table 4 – **Phytobiotics, prebiotics and probiotics used in poultry farming and their properties**

Вещество / Substance	*Свойства / Properties*	*Пример / Example*	*Ссылка / Reference*
Фитобиотики / Phytobiotics	Повышение устойчивости к окислительному стрессу / Increasing resistance to oxidative stress	Инулин, цикорий обыкновенный, зверобой продырявленный, левзея сафлоровидная, тимьян ползучий / Inulin, chicory, amber, safflower leucea, creeping thyme	[51]
	Улучшение пищеварения, повышение иммунитета, антибактериальное действие, улучшение качества мяса / Improved digestion, increased immunity, antibacterial effect, improved meat quality	Тимьян – *Thymus vulgaris*: обладает сильными антибактериальными свойствами / Thyme – *Thymus vulgaris*: has strong antibacterial properties. Чеснок – *Allium sativum*: широкий спектр антимикробной активности, стимулирует иммунитет / Garlic – *Allium sativum*: a wide range of antimicrobial activity, stimulates the immune system	[52, 53]
	Антимикробная активность и положительное влияние на кишечную микробиоту / Antimicrobial activity and positive effect on intestinal microbiota	Экстракт лука – увеличение относительной численности *лактококков* в подвздошной кишке и *лактобактерий* в слепой кишке / Onion extract – an increase in the relative abundance of lactococci in the ileum and lactobacilli in the cecum.	[54]
	Улучшение роста, продуктивности бройлеров и антиоксидантной стабильности мяса / Improving the growth, productivity of broilers and antioxidant stability of meat	Экстракт кизила – улучшает рост и антиоксидантный статус действует как антиоксидант, увеличивая срок хранения замороженного мяса птицы / Dogwood extract - improves growth and antioxidant status, acts as an antioxidant, increasing the shelf life of frozen poultry meat	[55]
Пробиотики / Probiotics	Поддержание здоровой микрофлоры, укрепление иммунной системы / Maintaining a healthy microflora, Strengthening the immune system	*Lactobacillus spp.; Bifidobacterium spp.; Enterococcus faecium; Bacillus spp.; Saccharomyces boulardii*	[56, 57]
	Поддержание здоровой микрофлоры, укрепление иммунной системы, снижение риска кишечных инфекций / Maintaining a healthy microflora, strengthening the immune system, reducing the risk of intestinal infections	Инулин способствует росту бифидобактерий и лактобацилл / Inulin promotes the growth of bifidobacteria and lactobacilli. Фруктоолигосахариды (ФОС) стимулируют рост пробиотических бактерий / Fructooligosaccharides (FOS) stimulate the growth of probiotic bacteria.	
Синбиотики / Synbiotics	Стимуляция роста полезной микрофлоры, снижение риска кишечных инфекций / Stimulating the growth of beneficial microflora, reducing the risk of intestinal infections	«Биовестин-лакто», «Максилак», «Мальтидофилюс», «Ламинолакт», «Бифидобак», «Линекс Форте», «Бифиформ Комплекс» / «Biovestin-lacto», «Maxilak» «Maltidofilus», «Laminolact», «Bifidobak», «Linex Forte», «Bifiform Complex»	

Выявлены ростостимулирующие свойства биоактивных соединений растительного происхождения, проявившиеся в увеличении живой массы цыплят-бройлеров и активации генов, связанных с ростом и развитием скелетных мышц (*MYOG*) и синтезом жирных кислот (*FASN*), а также интенсификацией метаболизма. Повышение экспрессии *MSTN* под влиянием биологически активных компонентов, входящих в состав экстракта тимьяна ползучего, обосновывает целесообразность проведения дальнейших исследований по определению оптимального уровня включения данного экстракта. Полученные данные являются нутригеномным обоснованием для разработки новой фитокомбинации для повышения мясной продуктивности цыплят-бройлеров на основе оптимального соотношения экстрактов цикория обыкновенного (*Cichorium intubus* L.), зверобоя продырявленного (*Hypericum perforatum* L.), сафлора красильного (*Cárthamus tinctórius* L.) и тимьяна ползучего (*Thymus serpyllum* L.) [51].

Фитобиотические добавки можно представить как сложный комплекс биологических соединений растительного происхождения, которые включают широкий спектр растений, трав, фруктов и продуктов переработки, таких как масла, соки, экстракты, фенольные соединения, каратинойды, танины, фитостерины, азотосодержащие вещества [52]. Анализ литературы продемонстрировал перспективы использования фитобиотиков в птицеводстве благодаря выраженному положительному влиянию на продуктивность, неспецифическую резистентность и физиологическое состояние птицы [53]. Фитобиотики являются одной из исследуемых альтернатив антибиотикам у птицы и домашнего скота из-за их антимикробной активности и положительного влияния на микробиоту кишечника и продуктивные свойства. Они повышают активность пищеварительных ферментов, усиливают конверсию кормов и, следовательно, улучшают продуктивные параметры сельскохозяйственных животных. Эти усовершенствования в функции пищеварения были связаны с ростом полезной микрофлоры кишечника у бройлеров, например молочнокислых бактерий – лактобактерий (*Lactobacillus*, *Acidophilus*) и бифидобактерий (*Bifidobacterium* bifidum) [54].

Например, в одной из статей описывался эксперимент по кормлению цыплят-бройлеров кросса Ross 308 экстрактом кизиловой вишни. Результаты показали, что 200 мг/кг экстракта значительно увеличили уровень экспрессии генов переносчиков глюкозы *GLUT*, что споспособствовало набору массы [55].

Пребиотики можно представить как биологические активные добавки немикробного происхождения, которые не перевариваются в кишечнике и способны оказывать положительный эффект на организм через стимуляцию роста метаболической активности нормальной микрофлоры кишечника. Пробиотики, наоборот, являются веществами микробного происхождения, оказывающие благоприятные эффекты на физиологические функции, биохимические и поведенческие реакции организма через оптимизацию его микробного статуса. Синбиотики представляют собой комбинацию пребиотиков и пробиотиков. Добавление синбиотических добавок в рацион кормления цыплят-бройлеров способствует лучшему перевариванию питательных веществ. К тому же активность пробиотиков и пребиотиков направлена на нормализацию микрофлоры желудочно-кишечного тракта бройлеров. [56, 57].

Заключение. Промышленное производство мяса цыплят-бройлеров базируется на выращивании высокопродуктивных и скороспелых кроссов. Однако существует множество факторов, способных негативно влиять на скорость роста, массу, аппетит и усвояемость корма у выращиваемой птицы. Поэтому одной из целей птицеводства является поиск кормовых добавок, которые способны изменять активность различных генов, отвечающих за показатели продуктивности у бройлеров. Анализ литературных данных показал, что за рост и развитие мышечной и скелетной мышечной ткани у цыплят-бройлеров, отвечает ряд генов – *GH, MYOG, MYOD, MSTN, IGF-1, FGF 2*, за формирование жировой ткани – *LEP, AdipoQ, FABP2, ACACA, PPARA, FASN*, за транспорт нутриентов – *SLC2A1, SLC2A2, SLC2A3, SLC7A1, SLC7A2, SLC7A5, SLC7A6, SLC7A7, SLC38A2*. В работах многих авторов показано, что на экспрессию генов влияют различные добавки – фитобиотики, пребиотики, пробиотики и синбиотики.

References

1. Андреев В. П. Ген: структурно-функциональная организация единиц генетической информации. Журнал Гродненского государственного медицинского университета. 2007;4(20):143–152. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=19091988 EDN: QBUNWH

Andreyev V. P. Gene: structural and functional organization of genetic information units. *Zhurnal Grodnenskogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta* = Journal of the Grodno State Medical University. 2007;4(20):143–152. (In Belarus). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=19091988

2. Travers A., Muskhelishvili G. DNA structure and function. The FEBS journal. 2015;282(12):2279–2295. DOI: https://doi.org/10.1111/febs.13307

3. Маслакова А. А., Долгих В. А., Землянская Е. В. Регуляция экспрессии генов, или что заставляет гены работать. Природа. 2023;(10(1298)):13–18. DOI: https://doi.org/10.7868/S0032874X23100022 EDN: SAFRXR

Maslakova A. A., Dolgikh V. A., Zemlyanskaya E. V. Regulation of gene expression, or what enables genes to operate. *Priroda.* 2023;(10(1298)):13–18. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.7868/S0032874X23100022

4. Йылдырым Е. А., Грозина А. А., Вертипрахов В. Г., Ильина Л. А., Филиппова В. А., Лаптев Г. Ю. и др. Экспрессия генов, ассоциированных с иммунитетом, в тканях слепых отростков кишечника и поджелудочной железы цыплят-бройлеров (*Gallus Gallus* L.) при экспериментальном т-2 токсикозе. Сельскохозяйственная биология. 2021;56(4):664–681. DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.4.664rus EDN: VZYFUA

Yildirim E. A., Grozina A. A., Vertiprakhov V. G., Ilyina L. A., Filippova V. A., Laptev G. Yu. et al. Effect of t-2 toxin on expression of genes associated with immunity in tissues of the blind processes of the intestinal and pancreas of broilers (*Gallus Gallus* L.). *Selskokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2021;56(4):664–681. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.4.664rus

5. Титов В. Ю., Долгорукова А. М., Кочиш И. И., Мясникова О. В., Никонов И. Н. Особенности метаболизма оксида азота в эмбрионах разных видов птиц как генетически обусловленный признак, связанный с мясной продуктивностью. Сельскохозяйственная биология. 2022;57(2):343–355. DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.2.343rus EDN: WQVEIJ

Titov V. Yu., Dolgorukova A. M., Kochish I. I., Myasnikova O. V., Nikonov I. N. Features of nitric oxide metabolism in embryos of different bird species as genetically determined sign associated with meat productivity. *Selskokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2022;57(2):343–355. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.2.343rus

6. Gonzalez-Rivas P. A., Chauhan S. S., Ha M., Fegan N., Dunshea F. R, Warner R. D. Effects of heat stress on animal physiology, metabolism, and meat quality: A review. Meat Science. 2020;162:108025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.108025

7. Лаптев Г. Ю., Йылдырым Е. А., Ильина Л. А., Филиппова В. А., Калиткина К. А., Пономарева Е. С. и др. Экспрессия генов иммунитета и адаптации и состав микробиома у родительского поголовья кур и петухов (*Gallus Gallus L.*) линий СМ5 и СМ9 кросса Смена 9. Сельскохозяйственная биология. 2023;58(2):313–332. DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.2.313rus EDN: DLLLIU

Laptev G. Yu., Yildirim E. A., Ilyina L. A., Filippova V. A., Kalitkina K. A., Ponomareva E. S. et al. Expression of genes of immune response and adaptation and cecal microbiome composition in males and females of chickens (*Gallus Gallus* L.) in CM5 and CM9 preparental lines of Smena 9 cross. *Selskokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2023;58(2):313–332. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.2.313rus

8. Боголюбова Н. В., Некрасов Р. В., Никанова Д. А., Зеленченкова А. А., Колесник Н. С., Рыков Р. А. и др. Биохимические и молекулярно-генетические индикаторы антиоксидантной защиты и иммунитета у петушков (*gallus gallus domesticus*) разных генотипов. Сельскохозяйственная биология. 2023;58(4):669–684. DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.4.669rus EDN: KFERWG

Bogolyubova N. V., Nekrasov R. V., Nikanova D. A., Zelenchenkova A. A., Kolesnik N. S., Rikov R. A. et al. Biochemical and molecular genetic indicators of antioxidant protection and immunity in male chicks (*gallus gallus domesticus*) of different genotypes. *Selskokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2023;58(4):669–684. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.4.669rus

9. Ларкина Т. А., Дементьева Н. В. Влияние генов на формирование скелетных мышц у кур. Международный научно-исследовательский журнал. 2023;11(137):19. DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.38 EDN: DHITTA

Larkina T. A., Dementeva N. V. Influence of genes on skeletal muscle formation in chickens. *Mezhdunarodny nauchno-issledovatelsky zhurnal* = International Research Journal. 2023;11(137):19. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.38

10. Shi X., Garry D. J. Muscle stem cells in development, regeneration, and disease. Genes&Development. 2006;20:1692–1708. DOI: https://doi.org/10.1101/gad.1419406

11. Meadows E., Cho J. H., Flynn J. M., Klein W. H. Myogenin regulates a distinct genetic program in adult muscle stem cells. Developmental Biology. 2008;322(2): 406–414. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2008.07.024

12. Булгакова С. В., Тренева Е. В., Захарова Н. О., Горелик С. Г. Старение и гормон роста: предположения и факты (обзор литературы). Клиническая лабораторная диагностика. 2019;64(12):708–715. DOI: http://dx.doi.org/10.18821/0869-2084-2019-64-12-708-715 EDN: RSBKKO

Bulgakova S. V., Treneva E. V., Zakharova N. O., Gorelik S. G. Aging and growth hormone: assumptions and facts (literature review). *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika* = Clinical Laboratory Diagnostics. 2019;64(12):708–715. (In Russ.). DOI: http://dx.doi.org/10.18821/0869-2084-2019-64-12-708-715

13. Mohammadabadi M., Bordbar F., Jensen J., Du M., Guo W. Key Genes Regulating Skeletal Muscle Development and Growth in Farm Animals. Animals. 2021;11(3):835. DOI: https://doi.org/10.3390/ani11030835

14. Xiao Y., Wu C., Li K., Gui G., Zhang G., Yang H. Association of growth rate with hormone levels and myogenic gene expression profile in broilers. Journal of Animal Science and Biotechnology. 2017;8:43. DOI: https://doi.org/10.1186/s40104-017-0170-8

15. Тюрина Д. Г., Лаптев Г. Ю., Йылдырым Е. А., Ильина Л. А., Филиппова В. А., Бражник Е. А. и др. Продуктивность и экспрессия генов у цыплят-бройлеров (*Gallus Gallus L.*) кросса Ross 308 под влиянием антибиотиков, глиофосфата и штамма *Bacillus sp.* Сельскохозяйственная биология. 2022;57(6):1147–1165. DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.6.1147rus EDN: JWCPAX

Tyurina D. G., Laptev G. Yu., Yildirim E. A., Ilyina L. A., Filippova V. A., Brazhnik E. A. et al. Influence of antibiotics, glyphosate and a *Bacillus* sp. strain on productivity performance and gene expression in cross Ross 308 broiler chickens (*Gallus Gallus* L.). *Selskokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2022;57(6):1147–1165. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.6.1147rus

16. Esposito P., Picciotto D., Battaglia Y., Costigliolo F., Viazzi F., Verzola D. Myostatin: Basic biology to clinical application. Advances in Clinical Chemistry. 2022;106:181–234. DOI: https://doi.org/10.1016/bs.acc.2021.09.006

17. Кукес В. Г., Газданова А. А., Фуралев В. А., Маринин В. Ф., Перков А. В., Ленкова Н. И. и др. Современное представление о биологической роли и клиническом значении миостатина – главного регулятора роста и дифференцировки мышц. Медицинский вестник Северного Кавказа. 2021;16(3):327–332. DOI: https://doi.org/10.14300/mnnc.2021.16079 EDN: IIAHRL

Kukes V. G., Gazdanova A. A., Furalev V. A., Marinin V. F., Perkov A. V., Lenkova N. I. et al. Modern conception of myostatin biological role and clinical significance as the main regulator of muscle growth and differentiation. *Meditsinsky vestnik Severnogo Kavkaza* = Medical News of the North Caucasus. 2021;16(3):327–332. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.14300/mnnc.2021.16079

18. Zhiliang G., Dahai Z., Ning L., Hui L., Xuemei D., Changxin W. The single nucleotide polymorphisms of the chicken myostatin gene are associated with skeletal muscle and adipose growth. Science in China. Series C, Life sciences. 2004;47(1):25–30. DOI: https://doi.org/10.1360/02yc0201

19. Bhattacharya T. K., Reddy B. R., Chatterjee R. N., Ashwini R. Myostatin (GDF8) gene and its intriguing role in regulating growth in poultry. The Indian Journal of Animal Sciences. 2022;92(10):1141–1148. DOI: https://doi.org/10.56093/ijans.v92i10.124368

20. Сизова Е. А., Лутковская Я. В. Экспрессия генов, связанных с хозяйственно полезными признаками цыплят-бройлеров (*Gallus Gallus domesticus*), под влиянием различных паратипических факторов (обзор). Сельскохозяйственная биология. 2023;58(4):581–597. DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.4.581rus EDN: GSSMJR

Sizova E. A., Lutkovskaya Ya. V. Expression of genes associated with economically useful traits in broiler chickens (*Gallus gallus domesticus*) under the influence of various paratypical factors (review). *Selskokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2023;58(4):581–597. DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2023.4.581rus

21. Kareem K. Y., Loh T. C., Foo H. L., Akit H., Samsudin A. A. Effects of dietary postbiotic and inulin on growth performance, *IGF1* and *GHR* mRNA expression, faecal microbiota and volatile fatty acids in broilers. BMC Veterinary Research. 2016;12(1):163. DOI: https://doi.org/10.1186/s12917-016-0790-9

22. Lei M., Peng X., Zhou M., Luo C., Nie Q., Zhang X. Polymorphisms of the IGF1R gene and their genetic effects on chicken early growth and carcass traits. BMC Genetics. 2008;9:70. DOI: https://doi.org/10.1186/1471-2156-9-70

23. Amills M., Jiménez N., Villalba D., Tor M., Molina E., Cubiló D. et al. Identification of three single nucleotide polymorphisms in the chicken insulin-like growth factor 1 and 2 genes and their associations with growth and feeding traits. Poultry Science. 2003;82(10):1485–1493. DOI: https://doi.org/10.1093/ps/82.10.1485

24. Nugent M. A., Iozzo R. V. Fibroblast growth factor-2. The International Journal of Biochemistry Cell Biology. 2000;32(2):115–120. DOI: https://doi.org/10.1016/s1357-2725(99)00123-5

25. Buckingham M., Relaix F. PAX3 and PAX7 as upstream regulators of myogenesis. Seminars in Cell & Developmental Biology. 2015;44:115–125. DOI: https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2015.09.017

26. Wang H. B., Li H., Wang Q. G., Zhang X. Y., Wang S. Z., Wang Y. X., Wang X. P. Profiling of chicken adipose tissue gene expression by genome array. BMC Genomics. 2007;8:193. DOI: https://doi.org/10.1186/1471-2164-8-193

27. Kersten S. Mechanisms of nutritional and hormonal regulation of lipogenesis. The EMBO Reports. 2001;2(4):282–286. DOI: https://doi.org/10.1093/embo-reports/kve071

28. Ohkubo T., Nishio M., Tsurudome M., Ito M., Ito Y. Existence of leptin receptor protein in chicken tissues: isolation of a monoclonal antibody against chicken leptin receptor. General and Comparative Endocrinology. 2007;151(3):269–273. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2007.01.021

29. Hu Y., Zhang R., Zhang Y., Li J., Grossmann R., Zhao R. In ovo leptin administration affects hepatic lipid metabolism and microRNA expression in newly hatched broiler chickens. Journal of Animal Science and Biotechnology. 2012;3(1):16. DOI: https://doi.org/10.1186/2049-1891-3-16

30. Yan J., Gan L., Qi R., Sun C. Adiponectin decreases lipids deposition by p38 MAPK/ATF2 signaling pathway in muscle of broilers. Molecular Biology Reports. 2013;40(12):7017–7025. DOI: https://doi.org/10.1007/s11033-013-2821-y

31. Larkina T. A., Sazanova A. L., Fomichev K. A., Barkova O. Y., Malewski T., Jaszczak K., Sazanov A. A. HMG1A and PPARG are differently expressed in the liver of fat and lean broilers. Journal of Applied Genetics. 2011;52(2):225–228. DOI: https://doi.org/10.1007/s13353-010-0023-z

32. Hu G., Wang S., Tian J., Chu L., Li H. Epistatic effect between ACACA and FABP2 gene on abdominal fat traits in broilers. Journal of Genetics and Genomics. 2010;37(8):505–512. DOI: https://doi.org/10.1016/S1673-8527(09)60070-9

33. Wang H. B., Li H., Wang Q. G., Zhang X. Y., Wang S. Z., Wang Y. X., Wang X. P. Profiling of chicken adipose tissue gene expression by genome array. BMC Genomics. 2007;8:193. DOI: https://doi.org/10.1186/1471-2164-8-193

34. Cui H. X., Zheng M. Q., Liu R. R., Zhao G. P., Chen J. L., Wen J. Liver dominant expression of fatty acid synthase (FAS) gene in two chicken breeds during intramuscular-fat development. Molecular Biology Reports. 2012;39(4):3479–3484. DOI: https://doi.org/10.1007/s11033-011-1120-8

35. Kishawy A. T. Y., Al-Khalaifah H. S., Nada H. S., Roushdy E. M., Zaglool A. W., Ahmed Ismail T. et al. Black Pepper or Radish Seed Oils in a New Combination of Essential Oils Modulated Broiler Chickens' Performance and Expression of Digestive Enzymes, Lipogenesis, Immunity, and Autophagy-Related Genes. Veterinary Sciences. 2022;9(2):43. DOI: https://doi.org/10.3390/vetsci9020043

36. Bigot K., Mignon-Grasteau S., Picard M., Tesseraud S. Effects of delayed feed intake on body, intestine, and muscle development in neonate broilers. Poultry Science. 2003;82(5):781–788. DOI: https://doi.org/10.1093/ps/82.5.781

37. Wang Y., Li Y., Willems E., Willemsen H., Franssens L., Koppenol A. et al. Spread of hatch and delayed feed access affect post hatch performance of female broiler chicks up to day 5. Animal. 2014;8(4):610–617. DOI: https://doi.org/10.1017/S175173111400007X

38. Kheravii S. K., Swick R. A., Choct M., Wu S. B. Upregulation of genes encoding digestive enzymes and nutrient transporters in the digestive system of broiler chickens by dietary supplementation of fiber and inclusion of coarse particle size corn. BMC Genomics. 2018;19(1):208. DOI: https://doi.org/10.1186/s12864-018-4592-2

39. Byers M. S., Howard C., Wang X. Avian and Mammalian Facilitative Glucose Transporters. Microarrays (Basel, Switzerland). 2017;6(2):7. DOI: https://www.mdpi.com/2076-3905/6/2/7

40. Zhang W., Sumners L. H., Siegel P. B., Cline M. A., Gilbert E. R. Quantity of glucose transporter and appetite-associated factor mRNA in various tissues after insulin injection in chickens selected for low or high body weight. Physiological Genomics. 2013;45(22):1084–1094. DOI: https://doi.org/10.1152/physiolgenomics.00102.2013

41. Seki Y., Sato K., Kono T., Abe H., Akiba Y. Broiler chickens (Ross strain) lack insulin-responsive glucose transporter GLUT4 and have GLUT8 cDNA. General and Comparative Endocrinology. 2003;133(1):80–87. DOI: https://doi.org/10.1016/s0016-6480(03)00145-x

42. Zhao J. P., Bao J., Wang X. J., Jiao H. C., Song Z. G., Lin H. Altered gene and protein expression of glucose transporter1 underlies dexamethasone inhibition of insulin-stimulated glucose uptake in chicken muscles. Journal of Animal Science. 2012;90(12):4337–4345. URL: https://www.sci-hub.ru/10.2527/jas.2012-5100

43. Ji J., Tao Y., Zhang X., Pan J., Zhu X., Wang H. et al. Dynamic changes of blood glucose, serum biochemical parameters and gene expression in response to exogenous insulin in Arbor Acres broilers and Silky fowls. Scientific Reports. 2020;10(1):6697. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-020-63549-9

44. Al-Khalaifah H. S., Shahin S. E., Omar A. E., Mohammed H. A., Mahmoud H. I., Ibrahim D. Effects of graded levels of microbial fermented or enzymatically treated dried brewer's grains on growth, digestive and nutrient transporter genes expression and cost effectiveness in broiler chickens. BMC Veterinary Research. 2020;16(1):424. DOI: https://doi.org/10.1186/s12917-020-02603-0

45. Khwatenge C. N., Kimathi B. M., Nahashon S. N. Transcriptome analysis and expression of selected cationic amino acid transporters in the liver of broiler chicken fed diets with varying concentrations of lysine. International Journal of Molecular Sciences. 2020;21(16):5594. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms21165594

46. Taylor P. M. Role of amino acid transporters in amino acid sensing. The American journal of clinical nutrition. 2014;99(1):223S–230S. DOI: https://doi.org/10.3945/ajcn.113.070086

47. Payne J. A., Proszkowiec-Weglarz M., Ellestad L. E. Delayed access to feed alters expression of genes associated with carbohydrate and amino acid utilization in newly hatched broiler chicks. American journal of physiology. Regulatory, integrative and comparative physiology. 2019;317(6):864–878.
DOI: https://doi.org/10.1152/ajpregu.00117.2019

48. Alagawany M., Elnesr S. S., Farag M. R., Tiwari R., Yatoo M. I., Karthik K. et al. Nutritional significance of amino acids, vitamins and minerals as nutraceuticals in poultry production and health – a comprehensive review. The veterinary quarterly. 2020;41(1):1–29. DOI: https://doi.org/10.1080/01652176.2020.1857887

49. Patterson J. A., Burkholder K. M. Application of prebiotics and probiotics in poultry production. Poultry Science. 2003;82(4):627–631. DOI: https://doi.org/10.1093/ps/82.4.627

50. Yang Y, Iji P. A, Choct M. Dietary modulation of gut microflora in broiler chickens: a review of the role of six kinds of alternatives to in-feed antibiotics. World's Poultry Science Journal. 2009;65(1):97–114.
DOI: https://doi.org/10.1017/S0043933909000008

51. Селионова М. И., Трухачев В. И., Загарин А. Ю., Беляева Н. П., Куликов Е. И. Экспрессия генов, связанных с антиоксидантной защитой, у цыплят-бройлеров под влиянием биологически активных соединений растительного происхождения. Достижения науки и техники АПК. 2024;38(12):41–46.
DOI: https://doi.org/10.53859/02352451_2024_38_12_41 EDN: KCWHKL

Selionova M. I., Trukhachev V. I., Zagarin A. Yu., Belyaeva N. P., Kulikov E. I. Expression of genes associated with antioxidant defence in broiler chickens under the influence of bioactive compounds of plant origin. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2024;38(12):41–46. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.53859/02352451_2024_38_12_41

52. Шацких Е. В., Латыпова Е. Н. Показатели крови и продуктивность кур при использовании в рационе фитобиотических препаратов. Аграрный вестник Урала. 2023;23(8):78–88.
DOI: https://doi.org/10.32417/1997-4868-2023-237-08-78-88 EDN: CBPVJK

Shatskikh E. V., Latypova E. N. Blood parameters and productivity of chickens when using phytobiotic preparations in the diet. *Agrarny vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals. 2023;23(8):78–88. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.32417/1997-4868-2023-237-08-78-88

53. Zaikina A. S., Buryakov N. P., Buryakova M. A., Zagarin A. Y., Razhev A. A., Aleshin D. E. Impact of Supplementing Phytobiotics as a Substitute for Antibiotics in Broiler Chicken Feed on Growth Performance, Nutrient Digestibility, and Biochemical Parameters. Veterinary Sciences. 2022;9(12):672.
DOI: https://doi.org/10.3390/vetsci9120672

54. Rabelo-Ruiz M., Ariza-Romero J. J., Zurita-González M. J., Martín-Platero A. M., Baños A., Maqueda M. et al. *Allium*-Based Phytobiotic Enhances Egg Production in Laying Hens through Microbial Composition Changes in Ileum and Cecum. Animals. 2021;11(2):448. DOI: https://doi.org/10.3390/ani11020448

55. Ibrahim D., Moustafa A., Metwally A. S., Nassan M. A., Abdallah K., Eldemery F. et al. Potential Application of Cornelian Cherry Extract on Broiler Chickens: Growth, Expression of Antioxidant Biomarker and Glucose Transport Genes, and Oxidative Stability of Frozen Meat. Animals. 2021;11(4):1038.
DOI: https://doi.org/10.3390/ani11041038

56. Калоев Б. С. Экономическая эффективность комплексного использования биологически активных препаратов при выращивании цыплят-бройлеров. Международный научно-исследовательский журнал. 2021;(5-1(107)):156–159. DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.107.5.026 EDN: SZROYU

Kaloev B. S. On the economic efficiency of integrated use of biologically active substances in broiler raising. *Mezhdunarodny nauchno-issledovatelsky zhurnal* = International Research Journal. 2021;(5-1(107)):156–159. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.107.5.026

57. Ардатская М. Д. Пробиотики, пребиотики и метабиотики в коррекции микроэкологических нарушений кишечника. Медицинский совет. 2015;(13):94–99. DOI: https://doi.org/10.21518/2079-701X-2015-13-94-99 EDN: UNSZJJ

Ardatskaya M. D. Probiotics, prebiotics and metabiotics in the management of microecological bowel disorders. *Meditsinsky sovet* = Medical Council. 2015;(13):94–99. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.21518/2079-701X-2015-13-94-99

Вклад авторов: Сизова Е. А., Семынин Т. А. – концепция и план исследования, анализ данных, подготовка рукописи; Нечитайло К. С., Шошин Д. Е., Бардакова А. С. – анализ данных, подготовка рукописи; Рязанцева К. В. – концепция и план исследования, подготовка рукописи.

Сведения об авторах

Сизова Елена Анатольевна, доктор биол. наук, профессор РАН, профессор, заместитель директора по научной работе, ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук», ул. 9 Января, д. 29, г. Оренбург, Российская Федерация, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0002-5125-5981**

Нечитайло Ксения Сергеевна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук», ул. 9 Января, д. 29, г. Оренбург, Российская Федерация, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru,
ORCID: **https://orcid.org/0000-0002-8755-414X**

Рязанцева Кристина Владимировна, кандидат биол. наук, научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук», ул. 9 Января, д. 29, г. Оренбург, Российская Федерация, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru,
ORCID: **https://orcid.org/0000-0001-5134-0396**

Шошин Даниил Евгеньевич, младший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук», ул. 9, Января д. 29, г. Оренбург, Российская Федерация, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0003-3086-681X**

✉ **Семынин Тимофей Андреевич**, лаборант-исследователь, аспирант, ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук», ул. 9 Января, д. 29, г. Оренбург, Российская Федерация, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0009-0000-6854-6016,** e-mail: semynin_t@mail.ru

Бардакова Александра Сергеевна, лаборант-исследователь, магистрант, ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук», ул. 9 Января д. 29, г. Оренбург, Российская Федерация, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0009-0002-6807-4690**

Author contributions: Sizova E. A., Semynin T.A. – research concept and plan, data analysis, manuscript preparation; Nechitailo K. S., Shoshin D. E., Bardakova A. S. – data analysis, manuscript preparation; Ryazantseva K. V. – research concept and plan, manuscript preparation.

Information about the authors

Elena A. Sizova, DSc in Biological Science, professor of RAS, Deputy Director for Research, Federal Research Centre of Biological Systems and Agro-technologies of the Russian Academy of Sciences, 9 Yanvarya Str., 29, Orenburg, Russian Federation, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0002-5125-5981**

Ksenia S. Nechitailo, PhD in Biological Science, senior researcher, Federal Research Centre of Biological Systems and Agro-technologies of the Russian Academy of Sciences, 9 Yanvarya Str., 29, Orenburg, Russian Federation, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0002-8755-414X**

Kristina V. Ryazantseva, PhD in Biological Science, researcher, Federal Research Centre of Biological Systems and Agro-technologies of the Russian Academy of Sciences, 9 Yanvarya Str., 29, Orenburg, Russian Federation, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0001-5134-0396**

Daniil E. Shoshin, junior researcher, Federal Research Centre of Biological Systems and Agro-technologies of the Russian Academy of Sciences, 9 Yanvarya Str.,29, Orenburg, Russian Federation, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0003-3086-681X**

✉ **Timofey A. Semynin,** laboratory assistant, postgraduate, Federal Research Centre of Biological Systems and Agro-technologies of the Russian Academy of Sciences, 9 Yanvarya Str.,29, Orenburg, Russian Federation, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0009-0000-6854-6016,** e-mail: semynin_t@mail.ru

Alexandra S. Bardakova, laboratory assistant, master student, Federal Research Centre of Biological Systems and Agro-technologies of the Russian Academy of Sciences, 9 Yanvarya Str., 29, Orenburg, Russian Federation, 460000, e-mail: fncbst@mail.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0009-0002-6807-4690**

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.289–307
УДК 619:615.32:595.2

Использование материалов природного происхождения против паразитических насекомых и клещей (обзор)

© 2026. В. Н. Домацкий[1], Л. А. Глазунова[2]✉, Ю. В. Глазунов[1,2]
[1]*Всероссийский научно-исследовательский институт ветеринарной энтомологии и арахнологии – филиал ФГБНУ Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук, г. Тюмень, Российская Федерация,*
[2]*ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», г. Тюмень, Российская Федерация*

Использование пестицидов в сельском хозяйстве и других сферах деятельности человека взаимосвязано с важной мировой проблемой – защитой окружающей среды. В статье проанализированы материалы отечественных и зарубежных литературных источников в ретроспективе 20 лет. Значительный практический интерес представляют биопестициды, создаваемые на основе природных материалов или продуктов их превращения (микроорганизмы, растительные масла, экстракты растений, бактерии и грибы). Показаны основные преимущества биопестицидов. Производство биопрепаратов экономически более выгодно и более технологично, чем химических средств. Растения и микроорганизмы являются основными источниками биопестицидов из-за высокого содержания биологически активных соединений и антимикробных агентов. Самую большую группу в арсенале современных биопрепаратов по защите растений составляют микробные пестициды. По сравнению с синтетическими препаратами биопестициды отличаются экологичностью и отсутствием кумулятивного эффекта, они не вызывают резистентность у членистоногих (поэтому не требуются дополнительные расходы на постоянную смену технологий применения новых препаратов), избирательностью действия (влияют на определенный спектр вредителей, а не на все организмы), высокой рентабельностью. Одним из главных преимуществ биопестицидов бактериального, грибкового и вирусного происхождения по сравнению с химически синтезированными средствами является их видоспецифичность. Из недостатков следует указать на быструю деградацию действующих веществ, что значительно сокращает срок хранения препаратов. Мировой рынок биопестицидов на протяжении многих лет демонстрирует стабильный рост. При создании биопрепаратов в основном используются бактерии рода Bacillus, различные штаммы грибов Metarhizium anisopliae и Beauveria bassiana, которые высокоэффективны для борьбы с мухами Musca domestica, Stomoxys calcitrans, комарами рода Anopheles и видов Culex quinquefasciatus, Culex pipiens, большой восковой молью (огневкой) Galleria mellonella и иксодовыми клещами родов Ixodes, Dermacentor и Rhipicephalus.

Ключевые слова: *зеленая экономика, агропромышленный комплекс, вредители, паразитические членистоногие, мухи, комары, грибы, бактерии, устойчивость, биопестициды*

***Благодарности*:** работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках государственных заданий ФГБНУ Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук (тема № FWRZ – 2026-0018) и ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет» (регистрационный номер 1022040800309-3-4.3.1;1.6.12;1.6.14).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

***Для цитирования*:** Домацкий В. Н., Глазунова Л. А., Глазунов Ю. В. Использование материалов природного происхождения против паразитических насекомых и клещей (обзор). Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):289–307. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.289-307

Поступила в редакцию: 07.05.2025 Принята к публикации: 26.03.2026
Доработана после рецензирования: 05.08.2025 Опубликована онлайн: 27.04.2026

The use of natural materials against parasitic insects and ticks (review)

© 2026.Vladimir N. Domatsky[1], Larisa A. Glazunova[2]✉, Yuri V. Glazunov[1, 2]
[1]*All-Russian Scientific Research Institute of Veterinary Entomology and Arachnology – Division of Federal Research Centre Tyumen Scientific Centre of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russian Federation*
[2]*University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation*

The use of pesticides in agriculture and other areas of human activity is interrelated with a major global issue of environment protection. This article analyzes domestic and international literature over a 20-year period. Biopesticides based on natural materials or their derivatives (microorganisms, vegetable oils, plant extracts, bacteria, and fungi) are of significant

practical interest. The main advantages of biopesticides are demonstrated. The production of biological products is more cost-effective and technologically advanced than that of chemical products. Plants and microorganisms are the primary sources of biopesticides due to their high content of biologically active compounds and antimicrobial agents. Microbial pesticides constitute the largest group in the arsenal of modern biological products for plant protection. Compared to synthetic products, biopesticides are environmentally friendly and lack cumulative effects. They do not induce resistance in arthropods (therefore, eliminating the need for additional costs associated with constantly changing application technologies for new products). They are selective in action (they affect a specific range of pests rather than all organisms), and are highly cost-effective. One of the main advantages of bacterial, fungal, and viral biopesticides over chemically synthesized products is their species specificity. One drawback is the rapid degradation of the active ingredients, which significantly reduces the shelf life of the products. The global biopesticides market has demonstrated stable growth for many years. When creating biological preparations, bacteria of the genus Bacillus, various strains of the fungi Metarhizium anisopliae and Beauveria bassiana are mainly used, which are highly effective in controlling the flies Musca domestica, Stomoxys calcitrans, mosquitoes of the genus Anopheles and the species Culex quinquefasciatus, Culex pipiens, the large wax moth (fire moth) Galleria mellonella and ixodid ticks of the genera Ixodes, Dermacentor and Rhipicephalus.

Keywords: *green economy, agro-industrial complex, pests, parasitic arthropods, flies, mosquitoes, fungi, bacteria, resistance, biopesticides*

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of Federal Research Centre Tyumen Scientific Centre of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (theme No. FWRZ – 2026-0018) and University of Tyumen (registration number 1022040800309-3-4.3.1; 1.6.12; 1.6.14).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Domatsky V. N., Glazunova L. A., Glazunov Yu. V. The use of natural materials against parasitic insects and ticks (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):289–307. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.289-307

Received: 07.05.2025
Revised: 05.08.2025
Accepted for publication: 26.03.2026
Published online: 27.04.2026

Индустриализация агропромышленного комплекса требует постоянного совершенствования мер борьбы с вредителями сельскохозяйственных культур и патогенами животных. Основными средствами, используемыми для уничтожения паразитических членистоногих, являются синтетические композиции препаратов с гербицидными, инсектицидными и акарицидными свойствами. Интенсивная химизация мирового сельского хозяйства приводит к тому, что ежегодно в биосферу планеты поступает огромное количество различных химических веществ, в том числе и пестицидов, разнообразие которых представлено сотнями действующих веществ и десятками тысяч препаратов. Распознать наличие пестицидов в окружающей среде, сырье и конечном продукте достаточно сложно, так как методы их идентификации отличаются сложностью, дороговизной, трудоемкостью и при этом не всегда надежны, отстают от индустрии, производящей новые действующие вещества и препараты. Зачастую, чтобы разработать регламент и методики идентификации нового пестицида требуется значительное время, что не позволяет на протяжении длительного срока его определить в исследуемом материале. При этом недостаточно изучены эффекты от длительного действия пестицидов на живые организмы, что представляет собой серьезную опасность, так как основная их часть продолжительное время сохраняется в почве, разлагаясь от нескольких дней до десятков лет, они постоянно поступают в организм животных, людей с продуктами питания и кормами [1].

Глобальное и зачастую бесконтрольное применение пестицидов в сельском хозяйстве и других областях деятельности человека противоречит принципам защиты окружающей среды и способствует появлению устойчивых популяций вредителей. Большинство современных пестицидов обладают широким спектром действия, зачастую оказывают негативное влияние на почвенную микрофлору и полезных наземных организмов. Это стимулирует исследователей к поиску вместо сильнодействующих препаратов химического синтеза средств биологического происхождения, проявляющих выраженный эффект против конкретного патогена с минимизацией побочных действий. Наиболее привлекательными для этих целей являются препараты на основе природных соединений или продуктов их превращения, обладающие пестицидным свойством, среди которых экстракты и масла растений, продукты жизнедеятельности и непосредственно бактерии, грибы и другие натуральные вещества. Создание и использование биопестицидов перспективно с экономической и экологической точек зрения [2].

Важными преимуществами препаратов биологического происхождения в отличие от синтетических композиций являются минимальные риски для окружающей среды и человека, что немаловажно в контексте экологического воспитания и развития экологического сознания у населения. Селективное действие биопестицидов против конкретного возбудителя крайне редко вызывает побочные эффекты при их применении, что позитивно сказывается на биоте почвы, растений, животных, человека и способствует сохранению равновесия в биосфере. Отсутствие у паразитических организмов резистентности к биологическим пестицидам открывает долгосрочные перспективы к их использованию. Кроме того, применение биопестицидов обладает высокой рентабельностью для сельскохозяйственного производства, так как внедрение технологий их использования окупается в 30 раз быстрее по сравнению с химическими средствами защиты [3, 4, 5].

Среди множества позитивных свойств биопестицидов необходимо выделить их слабые стороны, среди которых сравнительно быстрая деградация действующих веществ, что сказывается на длительности срока хранения и технологических особенностях применения. Тем не менее расширение возможностей использования биопестицидов в сельском хозяйстве позволяет сформировать полноценное органическое производство и снизить химический прессинг на окружающую среду и человека как конечного потребителя продукции [6].

Развитие агрохимической промышленности на основе биопестицидов является очень перспективным направлением при условии усовершенствования выявленных недостатков и масштабировании производства биологических препаратов [7].

Цель обзора – анализ достижений мировой науки в области создания и использования биопестицидов против паразитических членистоногих.

Материал и методы. Использовали аналитический, сравнительный и системный методы научного исследования. Отбору и дальнейшему анализу подлежали научные работы, входящие в электронные базы данных eLIBRARY.RU, Cyberleninka, PubMed, WoS, Scopus в зависимости от их научной ценности относительно темы исследования. Анализ научных отечественных и зарубежных работ проведен в ретроспективе последних 20 лет. Отбор проводили по ключевым словам: зеленая экономика; биопестициды; биоакарициды; биоинсектициды; энтомопатогенные грибы; вредители; насекомые; клещи. Для настоящего обзора было отобрано 53 публикации, касающиеся создания, испытания и использования биопестицидов в сельском хозяйстве и ветеринарии.

Основная часть. *Общие сведения о природных биопестицидах.* Поскольку обойтись без средств химической защиты в настоящее время невозможно, то их замена на экологически безопасные вещества биологического происхождения является актуальной проблемой. Биопестициды – это вещества природного происхождения, для получения которых используются растения, микроорганизмы, некоторые минералы, растительные масла и другие источники (рис.) [8, 9].

Каждый источник играет специфическую роль и избирается с учетом требований для применения – объект воздействия, метод и частота использования, имеющаяся устойчивость к синтетическим и биологическим пестицидам, стабильность при хранении и другие. В зависимости от происхождения активных ингредиентов биопестициды делятся на несколько категорий: растительные препараты; антагонисты; компостные чаи; стимуляторы роста; хищники; феромоны [10, 11].

Растения и микроорганизмы являются основными источниками биопестицидов из-за высокого содержания биологически активных соединений и антимикробных агентов [12].

Интерес к биопрепаратам ежегодно возрастает по целому ряду причин, среди которых ужесточение экологических требований к производителям сельскохозяйственной продукции со стороны государства и стран экспортеров, развитие экологического сознания потребителей, постоянно возрастающая резистентность вредителей и низкая эффективность синтетических средств борьбы с патогенами. Биопестициды положительно зарекомендовали себя при использовании на большинстве патогенных организмов. Их востребованность определяется биологической эффективностью и узкой специфичностью, что позволяет сохранить нецелевые виды. При этом зачастую в сравнении с химическими средствами биопестициды проигрывают в стабильности при хранении и показателях эффективности в борьбе с вредителями и болезнями [13].

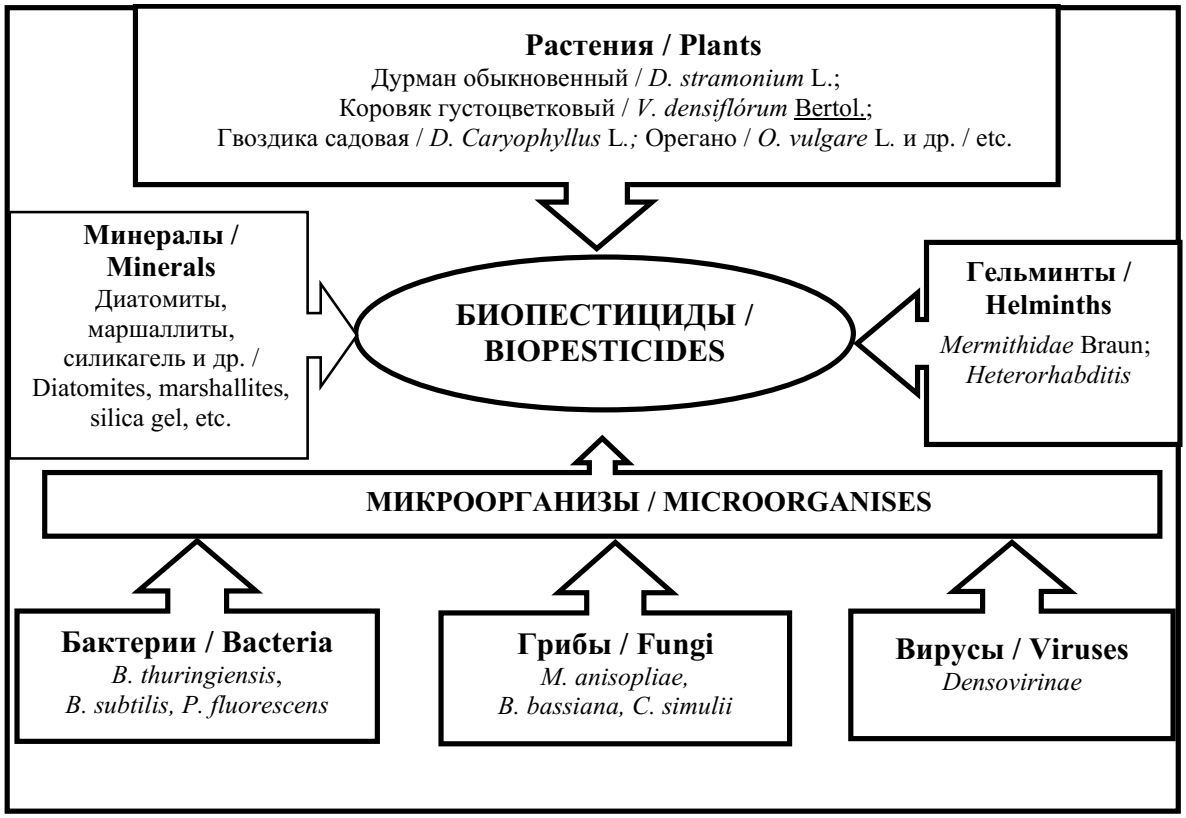


Рис. 1. **Природные материалы для изготовления биопестицидов /**
Fig. 1. **Natural materials for the production of biopesticides**

Рынок биопестицидов. В последнее время аграрии все больше отдают предпочтение препаратам биологического происхождения. Об этом свидетельствует факт роста рынка биопестицидов во всем мире. Так, емкость рынка биопестицидов Соединенных Штатов Америки (США) по разным подсчётам в 2022 г. составила от 6,2 до 403,9 млрд долларов США, и прогнозируется, что в ближайшие годы он будет расти в среднем на 14,1 % в год, составив около 13 млрд долларов США к 2028 г.[1].

Подавляющую часть рынка биопестицидов представляют препараты, созданные на основе различных штаммов *Bacillus thuringiensis* Berliner, 1915. Также производителями сельскохозяйственной продукции востребованы препараты, в состав которых входят энтомопатогенные нематоды и микромицеты. Основными производителями биопестицидов и биоконтролирующих составов являются компании, расположенные в США, странах Евросоюза и в Китае. Лидерство США обусловлено наибольшим спросом потребителей на органические продукты, также имеет значение упрощенная система регистрации препаратов биологического синтеза в этой стране. Активно развивается китайский рынок биопестицидов, который насчитывает более 120 действующих веществ[2].

Страны с развитым сельским хозяйством стремятся к переходу от синтетических пестицидов к средствам защиты биологического происхождения. Такую траекторию развития, кроме вышеупомянутых стран, предпочитают Швейцария, Япония, Индия, Швеция, Нидерланды, Англия, Италия, Германия, Канада и Финляндия. Мировые лидеры, производящие биопестициды, используют в качестве основы бактерии: *Bacillus subtilis* Cohn, 1872; *B. thuringiensis* Berliner, 1915; три вида *Pseudomonas* Migula, 1894; два вида *Streptomyces* Waksman and Henrici 1943; три вида грибов, бакуловирусы (*Baculoviridae*) и вирусы гранулеза.

[1]United States biopesticides market size & share analysis - growth trends & forecasts up to 2029. [Электронный ресурс]. URL: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/united-statesbiopesticides-marke (дата обращения: 30.04.2025).
[2]Там же.

Особое внимание компаний, производящих биопестициды и биоконтролирующие агенты, уделено молекулярно-биологическим исследованиям факторов патогенности видов, входящих в их рецептуры, а также разработке новых технологий применения. На высоком научном уровне ведутся работы по получению генно-модифицированных биоагентов. Например, биопестицидная компания Ecogen (США) совместно с семеноводческой компанией Mycogen (США) получила *Pseudomonas fluorescens* Migula, 1895, содержащую ген эндотоксина *B. thuringiensis* [14, 15].

Предпочтение зарубежных стран в использовании препаратов биологического синтеза для борьбы с паразитическими членистоногими пока не отразилась на рынке биопестицидов в России, где наблюдается их очевидный дефицит. На 1 июня 2023 года в России разрешено к использованию 65 наименований биологических пестицидов, среди которых 63,1 % составляют фунгициды, 27,7 % обладают инсектицидными и акарицидными свойствами. В группе биологических инсектицидов существенную долю занимают препараты, созданные на основе родов *Bacillus* Cohn, 1872, которые составляют основу 44,5 % биопрепаратов, *Trichoderma* Pers., 1801 используют в 15 % биопрепаратов, *Streptomyces avermectilis* – в 10,7 %. Зарубежные производители биопестицидов предпочитают использовать в своих составах бактерии *B. thuringiensis*. Биологические свойства бактерии позволяют использовать этот микроорганизм в качестве инсектицида и средства защиты растений от болезней. Наиболее часто эти биопестициды направлены на борьбу с личинками жуков-щелкунов (Elateridae Leach, 1815) – проволочниками, медведками (Gryllo-talpidae Leach, 1815), саранчей (Acrididae MacLeay, 1819), хрущами (Melolonthinae Samouelle, 1819), подгрызающими совками (Agrotis Ochsenheimer, 1816) [9][3].

Биопестициды растительного происхождения. Для производства биопестицидов из растений используются виды, которые применяются в пищевых, лекарственных, декоративных целях или встречаются в природе в лесах и на других необработанных территориях [16].

Для конкурентного замещения средств химического синтеза на биологические препараты из растительного сырья потребуется выращивание значительного объема массы растений и больших возделываемых площадей, что потенциально может конкурировать с выращиванием продуктов питания на сельскохозяйственных землях и развитием соответствующей отрасли [9].

Для определения инсектицидного действия против имаго комаров (*Anopheles superpictus* Grassi, 1899) в лабораторных условиях были проведены испытания препаратов с потенциальным биопестицидным эффектом, приготовленных из растений: гармала обыкновенного (*Peganum harmala* L., 1753); дурмана обыкновенного (*Datura stramonium* L.); перца стручкового (*Capsicum annuum* L., 1753); болиголова пятнистого (*Conium maculatum* L., 1753); коровяка обыкновенного (*Verbascum thapsus* L., 1753), а также настои – дурмана обыкновенного с мыльным раствором, дурмана обыкновенного с перцем стручковым. Предварительные испытания с использованием в качестве объекта исследований личинок кровососущих комаров позволили выявить наибольшую инсектицидную эффективность препаратов из гармала обыкновенного, болиголова пятнистого, перца стручкового, дурмана обыкновенного с добавлением мыльного раствора и смеси дурмана обыкновенного и перца стручкового. Для испытаний в производственных условиях использовали отвар дурмана обыкновенного, которым обрабатывали скотоводческие помещения. Проведены две серии экспериментов в трех опытных и одном контрольном скотоводческом помещении. До начала опытов определили численность имаго *An. superpictus,* которая в подопытных помещениях составила 200, 105, 350 особей соответственно, в контрольном помещении 150 особей. После проведения первой серии экспериментов и обработки помещений отваром дурмана обыкновенного численность имаго комаров в них составила 135, 60 и 140 особей на помещение, а в контрольном – 141 особь. Эффективность инсектицидного действия испытуемого отвара против имаго комаров *An. superpictus* составила 28,2; 39,2 и 57,4 % соответственно. Инсектицидная эффективность после второй серии опытов составила в пределах 21,1 – 55,4 % [17].

[3]Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской федерации. М., 2023. 924 с. URL: https://docs.cntd.ru/document/42023543

Инсектицидные свойства коровяка высокого густоцветкового (*Verbáscum densiflórum* Bertol) являются предметом исследования в областях защиты растений от вредителей и антигельминтного применения. Экстракты коровяка густоцветкового из цветков, листьев, стеблей и семян известны лечебными свойствами и применяются в народной медицине. Инсектицидные свойства коровяка были изучены на личинках природных популяций комаров семейства Chironomidae Newman, 1834 (мотыль) второго и третьего возраста. В экспериментах использовали 3,2%-й водный и 3%-й спиртовый экстракты. Проведенные исследования установили наличие инсектицидных свойств коровяка густоцветкового, которые показали гибель личинок комаров при применении водных и спиртовых экстрактов. Полученные результаты сравнивали с эталонным органическим фосфорсодержащим инсектицидом диазиноном. Установлено, что 1%-й спиртовой раствор коровяка густоцветкового обладает выраженным инсектицидным действием, применение его в экспериментах привело к гибели 100 % особей. Менее выраженным инсектицидным эффектом обладал 0,5%-й водный раствор – вызывает гибель чуть меньше 60 % особей [18, 19].

Биопестициды бактериального происхождения. Самую большую группу в арсенале современных биопрепаратов для защиты растений составляют микробные пестициды. Причем в их состав могут входить микроорганизмы разных систематических групп – бактерии, грибы, вирусы, простейшие, которые можно использовать для защиты растений [20, 21].

Спектр биопрепаратов на основе микроорганизмов, обладающих антогонистической активностью по отношению к вредителям растений, продолжает расширяться и проходить тестирование на нецелевых видах, в том числе на пчелах, что является необходимым условием регистрации пестицидных средств [22, 23].

Анализируя данные, можно с уверенностью утверждать, что микроорганизмы и продукты их жизнедеятельности являются наиболее конкурентоспособными и перспективными основами для промышленного производства биопестицидов и экологизации сельскохозяйственного производства. При массовом использовании биопестицидов микробного происхождения они экономически целесообразны и будут содействовать сохранению биоразнообразия, так как действуют целенаправленно на патогенные организмы и не оказывают влияния на нецелевые виды. Способность биопестицидов относительно быстро разлагаться и не наносить вреда окружающей среде формирует понимание, что такие препараты являются наиболее предпочтительными в экологизации сельского хозяйства [8].

Биопестициды на основе Bacillus spp. Создание коммерческих биоинсектицидов стартовало с открытия в начале XX века бактерии *B. thuringiensis*. Первый препарат на ее основе (Sporeine) появился в 1920-х гг., но из-за узкого спектра действия и нестабильности в производственных условиях их применение было крайне ограничено. Через 30 лет после открытия этой бактерии были обнаружены дополнительные свойства, которые позволили расширить возможности применения биопрепаратов, что стало основой для разработки новых форм препаратов [15, 24].

Наиболее активно пестициды на основе *B. thuringiensis* стали применять в 1980-х годах, когда проблема резистентности вредителей стала наиболее актуальной. С этого времени продолжаются исследования по поиску новых действующих веществ и созданию микробиологических пестицидов, которые являются неотъемлемой частью интегрированной системы защиты растений от вредителей, не заменяя, но дополняя арсенал химических средств [8, 25].

Уникальные свойства к биоконтролю, которые проявляют бактерии *Bacillus spp*., широко распространенные в почве, воде, воздухе, позволяют их рассматривать как наиболее перспективную основу биологических пестицидов. Свойство бактерий образовывать споры обеспечивает их долгосрочную жизнеспособность в неблагоприятных условиях среды. Эти грамположительные микроорганизмы способны переносить экстремальные изменения pH, перепады температуры, соленость и присутствие органических растворителей [8].

Основной характеристикой *B. thuringiensis* является синтез во время споруляции кристаллических соединений, известных как δ-эндотоксины, которые обладают инсектицидными свойствами. Токсичность Cry-белков традиционно объясняют образованием трансмембранных пор или ионных каналов, приводящих к осмотическому лизису клеток, что и вызывает гибель насекомых. Препараты обладают инсектицидными свойствами в отношении личинок чешуекрылых, двукрылых и жесткокрылых [8, 26].

Бактерии *B. thuringiensis* из группы *Bacillus cereus sensu lato* привлекают внимание исследователей благодаря своим выраженным инсектицидным свойствам. Для их характеристики и идентификации часто применяется полимеразная цепная реакция (ПЦР) с использованием специфических праймеров для обнаружения генов Cry, ответственных за продуцирование токсинов. Этот метод позволяет быстро и эффективно определить наличие нужного гена в исследуемых образцах. Более того, ПЦР была оптимизирована для проведения мультиплексной количественной ПЦР в реальном времени (кПЦР), что делает процедуру более удобной и безопасной. Такие технологии играют важную роль в современных исследованиях и позволяют более эффективно изучать и применять инсектицидные свойства бактерий *B. thuringiensis*. Разработанный мультиплексный анализ представляет собой значимый прогресс в исследованиях, направленных на обнаружение генов *Cry1A*, *Cry1C* и *Cry1F*, которые кодируют токсины, эффективные в борьбе с гусеницами. С использованием специально созданных праймеров, проверенных с помощью новейших технологий секвенирования следующего поколения (NGS), удалось успешно определить наличие указанных генов в образцах. В ходе исследования было проанализировано и сравнено 214 штаммов, что позволило получить ценные сведения о распространенности этих генов среди изученных организмов. Дополнительно подтверждена достоверность результатов путем сравнения данных мультиплексного анализа с результатами традиционной ПЦР. Обнаружение совпадений в результатах обоих методов говорит о высокой точности и надежности новой системы анализа, что делает ее ценным инструментом для дальнейшего изучения в области биотехнологии и сельского хозяйства [27].

Исследования по выявлению высокой патогенной активности штаммов *B. thuringiensis* против различных насекомых свидетельствуют о перспективности создания биопрепаратов на их основе. Особый интерес вызывает тот факт, что штаммы *B. thuringiensis* из Макапы (Бразилия) успешно прошли тестирование на личинках комнатных мух. С использованием метода ПЦР удалось обнаружить гены, ответственные за синтез белков Cry, Cyt и Vips. В результате исследования шесть штаммов проявили высокую эффективность, приводя к гибели от 70 до 100 % личинок, при этом пять из них содержали гены Cry. Эти результаты подчеркивают значимость использования биопрепаратов на основе *B. thuringiensis* для борьбы с насекомыми-вредителями, обеспечивая эффективный и экологически безопасный метод защиты растений. Сканирующая электронная микроскопия обнаружила формирование кристаллических включений с разнообразной морфологией, включая сферические (TR4J, SOL5DM, SOL6RN), кубовидные и бипирамидальные (TRO1TN и TRO2MQ), а также сочетание сферической и бипирамидальной форм (UNI2MA). Потенциальное содержание генов *Cry1*, *Cry2*, *Vip1* и *Vip3* указывает на возможность биоинсектицидной активности этих штаммов против мух из семейства Muscidae и других насекомых-вредителей различных отрядов. Это исследование подчеркивает биологическую активность бразильских штаммов *B. thuringiensis*, предполагая их потенциальное применение в борьбе с вредителями в сельском хозяйстве и других областях [28].

Результаты модельного эксперимента по выявлению потенциальных компонентов биопестицидов показали, что направленность антимикробной активности бактерий различается у штаммов, выделенных из разных местообитаний. В частности, штаммы, выделенные из кишечника почвенных беспозвоночных животных, отличаются относительно меньшим антагонизмом, по отношению к кишечным бактериям, чем штаммы, выделенные из кормового субстрата. Штаммы продуцентов, полученные из животных фитофагов и их корма – листьев сельскохозяйственных растений, могут быть потенциальными компонентами биопестицидов [29].

Энтомопатогенные грибы. Использование энтомопатогенных грибов в качестве биологического средства для борьбы с насекомыми-вредителями представляет собой эффективный и экологически безопасный метод в борьбе с паразитами. Среди наиболее перспективных, с точки зрения производства биопестицидов, являются представители родов *Beauveria* и *Metarhizium*.

Факторами вирулентности многих энтомопатогенных грибов часто являются литические ферменты, такие как протеазы, липазы и хитиназы, а также биологически активные соединения, включая токсины и иммуносупрессоры. Наиболее изученными представителями энтомопатогенной флоры являются грибы *Beauveria bassiana*, *Beauveria brongniartii*,

Beauveria felina, Metarhizium anisopliae, *Metarhizium acridum, Metarhizium robertsii* и *Metarhizium brunneum.* Кроме того, перспективными для борьбы с вредителями в сельском хозяйстве являются грибы родов *Cordyceps, Paecylomyces и Tolypocladium* [30].

Важными преимуществами являются простота культивирования этих грибов и безопасность для всех живых организмов, кроме насекомых. Однако этот подход не лишен существенных недостатков – это относительно низкая вирулентность, невысокая скорость действия и чувствительность к ультрафиолетовому излучению. Эта проблема может быть решена за счет генетической модификации используемых штаммов. Основными методами трансформации энтомопатогенных грибов являются полиэтиленгликоль-опосредованная трансформация протопластов, трансформация с помощью агробактерий, электропорация проросшенных конидий и химическая трансформация бластоспор. В геном организмов встраивают последовательности, кодирующие различные эффекторные молекулы, способные негативно воздействовать на зараженных ими насекомых, например, токсины из ядов хищных насекомых или паразитоидов. Недавно были созданы первые штаммы энтомопатогенных грибов, секретирующих в организм зараженных насекомых двуцепочечные РНК, способные подавлять экспрессию их жизненно важных белков. Повышение вирулентности данных штаммов происходит специфично к конкретному виду насекомого-вредителя. Для эффективного применения подобных пестицидов важно обеспечить доставку энтомопатогенного гриба к вредителю. Против кровососущих членистоногих, таких как клещи и комары, можно использовать опрыскивание животных и помещений. Наиболее часто биопрепараты на основе энтомопатогенных грибов применяются в растениеводстве [31].

Вирусные биопестициды. Использование вирусов, как основы биопрепаратов против насекомых – вредителей сельскохозяйственных культур, также является перспективным направлением. Основным недостатком вирусных биопрепаратов является их относительно низкая скорость воздействия на насекомых, что вероятно может быть решено увеличением вирулентности используемых вирусов, в том числе за счет их генетической модификации.

Так, применение рекомбинантного бакуловируса стимулирует синтез молекулы, чужеродной и токсичной для клетки насекомых, что будет способствовать наступлению гибели инфицированной особи гораздо раньше, чем при обычной вирусной инфекции [32].

В мировой литературе имеются данные о 299 документально подтвержденных случаях резистентности рыжего таракана к 45 соединениям из разных химических групп инсектицидов, что стимулирует исследователей к поиску средств, преодолевающих устойчивость этого вида [33].

Проведены опыты и получены данные об эффективности инсектицидной приманки на основе денсовируса дымчато-коричневого таракана *Periplaneta fuliginosa,* для рыжего *Blatta germanica*, американского *Blatta americana* и чёрного *Blatta orientalis* тараканов. В среднем смертность рыжих тараканов составила 70 % в течение 5 суток эксперимента, что соответствует необходимому показателю эффективности приманки. Суммарная гибель самцов и самок чёрных и американских тараканов составила ниже 70 %, что не позволяет рекомендовать это средство для борьбы с этими видами. Установлена большая чувствительность к приманке самцов рыжего таракана по сравнению с самками. В отсутствие альтернативного корма показатели смертности рыжих тараканов, резистентных к традиционным инсектицидам культур, не отличаются от таковой чувствительной расы тараканов. В присутствии альтернативного корма замедление действия приманки наблюдали у самок некоторых культур в 2,5–4,0 раза. Энтомопатогенные вирусы очень специфичны по отношению к своим хозяевам и могут привести к значительному сокращению численности восприимчивых популяций. Биоинсектициды могут стать необходимой альтернативой в борьбе с резистентными рыжими тараканами [34].

Прочие биопестициды. Средства на основе кремнийсодержащих порошков (диатомиты, маршаллиты, силикагель, диатомовая земля, кизельгур, диоксид кремния и др.) высокоактивны в отношении постельных клопов, рыжих тараканов, блох, крысиных клещей. Препараты на их основе необходимо включать в схемы ротации инсектицидов [35].

Лабораторными экспериментами зафиксирован патогенный потенциал энтомопатогенных нематод рода *Heterorhabditis* (*Heterorhabditis bacteriophora* Poinar, 1976, изолят HP88 и *Heterorhabditis baujardi* Phan, Subbotin, Nguyen & Moens, 2003 изолят LPP7) для преди-

магильных стадий осенней жигалки (*Stomoxys calcitrans* Linnaeus, 1758). Использование штамма *H. bacteriophora* HP88 выявило наибольшую патогенность для осенней жигалки, которое приводило к высокой смертности личинок (≥ 90 %), значительному подавлению выживаемости куколок (на 70–100 %) и появлению взрослых особей (на 96,7–100 %) при всех испытанных концентрациях (25, 50, 100, 150 и 200 нематод/личинку). Применение штамма *H. baujardi* LPP7 показывало аналогичные результаты при использовании лишь самой высокой из испытуемых концентраций – 200 нематод/личинку [36].

Так как спектр действия пестицидов биологического происхождения узкоспецифичен, для создания биопрепаратов целесообразно рассматривать их компоненты с учетом известной эффективности в отношении разных классов паразитов. Для прогнозирования направленного действия необходимо понимание диапазона действия биопестицидов различного происхождения. В настоящее время эктопаразитами, причиняющими значительный ущерб сельскому хозяйству, являются насекомые и клещи, для ограничения численности которых все чаще используются биоинсектициды и биоакарициды.

Биоинсектициды. Известно, что насекомые, которые приобрели в течение своей жизни резистентность к синтетическим препаратам, проявляют чувствительность к инсектицидам биологического происхождения. Так, три линии комаров (*Culex quinquefasciatus*) из природных популяций США, высокоустойчивые к ряду пиретроидов и фосфорорганических соединений, среднеустойчивые к фипронилу и имидаклоприду, оказались чувствительными к *B. thuringiensis var. israelensis* Barjac, 1978 [37].

Проведены исследования эффективности применения биоларвицидных гранул AQUABAC 200G (активные ингредиенты: *B. thuringiensis israelensis strain BMP 144 solids*, споры и инсектицидные токсины – 2,86 %; другие ингредиенты – 97,14 %) в водоемах с различным личиночным обилием, видовым составом и условиями обитания против личинок комаров рода *Anopheles* Meigen, 1818. Полевые эксперименты показали 95–100%-ную гибель личинок комаров рода *Anopheles* во всех опытных водоемах через 2-3 суток. В ходе исследований отмечено, что применение этого биопестицида оказалось эффективным, но непродолжительным и в отношении личинок комаров *Culex pipiens* Linnaeus, 1758 и *Culex modestus* Ficalbi, 1889. Установлено, что через 2–7 дней после обработки метаморфоз личинок продолжался без изменений, что связано с физическими свойствами биоларвицида, который характеризуется высокой удельной массой, вследствие чего препарат выпадает в осадок и не оказывает негативное действие на молодых личинок [38].

Основные исследования по изучению эффективности биоинсенктицидов направлены на борьбу с зоофильными мухами в ветеринарной и медицинской дезинсекции. В меньшей мере это касается мух вредителей растений ввиду широкого использования в растениеводстве высокоэффективных химических пестицидов.

В лабораторных исследованиях и в моделируемых полевых опытах изучена восприимчивость взрослой и личиночной стадии комнатной мухи *Musca domestica* Linnaeus, 1758 (Diptera: Muscidae) к двум энтомопатогенным грибам *M. anisopliae* (Metsch.) Sor. и *B. bassiana* (Bals.) Vuill. Исследования на взрослых комнатных мухах проводились при различных концентрациях конидий в диапазоне от 10^3 до 10^9 конидий/мл в чашках Петри и миникамерах. Абсолютную смертность наблюдали в течение 4-5 дней при всех протестированных концентрациях. Было обнаружено, что *M. anisopliae* более эффективен при LC50 $6{,}75 \times 10^7$ конидий/мл по сравнению с $1{,}21 \times 10^8$ конидий/мл *B. bassiana* в биоанализе на чашке Петри. Аналогичная тенденция отмечена и в миникамерном биоанализе. Ларвицидная активность, оцененная с помощью биоанализа на чашке Петри, также показала, что *M. anisopliae* был более эффективным ларвицидом с LC50 $4{,}1 \times 10^8$ конидий/мл по сравнению с $3{,}31 \times 10^9$ конидий/мл *B. bassiana*. Ларвицидную активность дополнительно оценивали в моделируемых полевых условиях разлагающейся матрицы отходов с использованием сухих конидиальных составов (10^8 конидий/г) обоих грибов. Смертность личинок, полученная в этом анализе, составила 43 % (*B. bassiana*) и 63 % (*M. anisopliae*). Значительно более высокая эффективность *M. anisopliae* в качестве взрослого и ларвицидного агента по сравнению с *B. bassiana* в лабораторных опытах, а также в смоделированных полевых условиях позволяет предполагать положительный потенциал для использования этого компонента для включения в комплексную программу борьбы с комнатной мухой [39].

В полевых условиях оценена инсектицидная активность трех составов в виде приманки, капсул и эмульсии на основе *B. bassiana*. Приманка на основе чайных отходов показала 100%-ную смертность (в течение 72 час.) в лабораторных экспериментах против взрослых комнатных мух *M. domestica*. При полевом исследовании с использованием ловушек зафиксирована 65 и 100%-ная смертность (в течение 60 ч) отловленных мух. Хотя состав приманки был дешевым, простым в приготовлении и транспортировке, его способность к хранению ограничена. Поэтому были предприняты попытки создания более совершенных составов в форме капсул и эмульсий. Инкапсулированные конидии *B. bassiana* (с использованием сухого обезжиренного молока, поливинилпирролидона К-90 и глюкозы в качестве добавок) продемонстрировали 100%-ую конидиальную прорастаемость и сохранили 78 % конидиальной жизнеспособности, даже после хранения в течение 12 месяцев при температуре 30 °C. Инкапсулированный продукт показал 54,8 % (свежеприготовленный) и 30,6 % (после 12-месячного хранения) смертность личинок комнатной мухи в моделируемых полевых условиях. Рецептуру эмульсии готовили с использованием Твин 20 в качестве поверхностно активного вещества с семью растительными маслами: соевым, рапсовым, подсолнечным, оливковым, касторовым, тилиловым и льняным. Эмульсию с льняным маслом, показавшую максимальную конидиальную всхожесть (94 %), оценивали по сроку годности и патогенности в отношении личинок комнатной мухи. Анализ срока годности эмульсии выявил 28 % конидиального прорастания и 19,9 % смертности личинок комнатной мухи после 12 месяцев хранения по сравнению с 94 % конидиального прорастания и 51,7 % смертности личинок при использовании свежего продукта. Предполагается, что у инсектицидов, созданных на основе *B. bassiana*, есть значительные перспективы в борьбе с *M. domestica* и высокий потенциал коммерциализации [40].

Лабораторные исследования инсектицидного действия различных изолятов энтомопатогенных грибов *M. anisopliae* на комнатную муху *M. domestica* привели к выбору наиболее перспективного изолята M16. Для составления рецептуры аттрактантов были испытаны основы, способные увеличивать посещаемость мух. Установлено, что состав приманки, содержащий *M. anisopliae* и сухое обезжиренное молоко, привлекает наибольшее количество посещений комнатными мухами, и впоследствии его сравнили с обычными химическими приманками в анализе эффективности. Химическая приманка (0,5 % имидаклоприда) вызывала более высокую смертность, чем микоинсектицидная приманка, однако аналогичные уровни смертности были достигнуты через 4–5 дней после воздействия [41].

Проведены лабораторные исследования по изучению вирулентности и времени летального действия энтомопатогенных грибов *B. bassiana* (Balsamo) *Vuillemin* (штаммы GHA, HF23, NFH10 и L90) и *Metarhizium anisopliae/brunneum* (Metchnikoff)/Petch (штамм F52) путем воздействия на взрослых мух *M. domestica* дисков из фильтровальной бумаги, обработанных конидиями, в течение 2 часов. Установлено, что летальное время, вызывающее до 50 % смертности (LT50) при высокой концентрации 1×10^9 конидий варьировало от 3,8 до 5,2 дней для всех пяти штаммов. GHA, NFH10 и L90 уничтожали мух быстрее, чем штамм *M. anisopliae* F52; HF23 не отличался ни от *M. anisopliae*, ни от других штаммов *B. bassiana*. Попытки с использованием штамма NFH10 вызвать более быструю гибель мух путем отбора по 10 пассажам от гриба к мухе не привели к сокращению времени гибели мухи исследуемого штамма [42].

Для увеличения скорости гибели *M. domestica* предлагается применить генетическую модификацию патогена, который будет способствовать ускорению его проникновения через кутикулу. Исследуются причины различий эффективности *B. bassiana* против личинок комнатной мухи (гибель личинок от 0 до 70 %): вариации вирулентности штамма; метод культивирования грибов; конидиальная доза или концентрация; возраст мухи; статус питания личинки-хозяина; метод воздействия; свойства субстрата для выращивания личинок и различия в чувствительности культур мух [43].

Производственные испытания коммерческого биоинсектицида «Битоксибациллин» (ПО «Сиббиофарм», Россия), основным действующим веществом которого являются споры и клетки культуры *B. thuringiensis var. thuringiensis*, законсервированные в белковую обо-

лочку, – эндотоксин и термостабильный экзотоксин проведены в Липецкой области на базе птицефабрики «Новоникольская». Наблюдения показали, что испытуемый препарат эффективен против личинок комнатной мухи в 3%-й концентрации при толщине слоя отходов до 50 см – 3 л на 1 м^2, скоплении навоза при толщине слоя субстрата свыше 50 см – 10 л на 1 м^2 [44].

Лабораторные опыты по изучению воздействия энтомопатогенного гриба *M. anisopliae* на разные стадии предимагинального развития осенней жигалки *S. calcitrans* показали, что он обладал губительным действием на яйца, но не влиял на личинки и куколки [45].

Изучена способность пяти изолятов *B. thuringiensis* (*Berliner*) вызывать смертность у взрослых мух *S. calcitrans* при скармливании с сахаром, кровью или смесью сахара и крови [46].

Применение *B. thuringiensis subsp. aizawai*, штамм 12К и *B. thuringiensis subsp*. *thuringiensis*, штамм ВНИИВЭА-177 в составе коммерческого биоинсектицида Туринбаш-Ж (Башинком, Россия) – эффективно в отношении насекомых отрядов Lepidoptera, Coleoptera, Hymenoptera, Diptera [47].

Изучена эффективность использования энтомопатогенных грибов *M. anisopliae* и *B. bassiana* для уничтожения постельных клопов (*Cimex lectularius* Linnaeus, 1758). Резистентность постельных клопов к пиретроидам не приводит к перекрёстной устойчивости к инфицированию спорами *B. bassiana*. Смертность насекомых прямо пропорциональна концентрации конидий, которая имеет решающее значение для индукции горизонтального переноса, способного увеличить смертность популяции насекомых без необходимости прямого контакта между постельными клопами и инокулированным субстратом. Остатки пиретроидов на обработанных поверхностях значительно снижают прорастание спор *B. bassiana*. В настоящее время не выявлена резистентность насекомых к микоинсектицидам в полевых условиях, однако показано, что в лабораторных условиях её появление вероятно [48].

Личинки мошек также подвержены поражению грибами. В сборах энтомопатогенный гриб *Coelomycidium simulii* Debais, 1919 обнаружен у 9 видов мошек: *Banksia erythrocephala* (C. A. Gardner) A. R. Mast & K. R.Thiele; *Schizaea pusilla* Pursh; *Wilhelmia equina* Linnaeus, 1758; *Odontomyia ornate* Meigen, 1822; *Argentisimulium noelleri* Friederichs, 1920; *Simulium rostratum* Lundstrom, 1911; *Simulium morsitans* Edwards, 1915; *Simulium paramorsitans* Rubtsov, 1956 и *Simulium promorsitans* Rubtsov, 1956. Инфицирование мошек грибами регистрировали на протяжении всего летнего сезона с пиками численности пораженности личинок – в начале лета и сентябре. Зараженных особей мошек обнаруживали в средних и малых реках, ручьях и мелиоративных каналах. Наиболее инфицированные личинки мошек обитали в водотоках, сильно заросших водной растительностью. Максимальная степень инфицирования выявлена у особей *B. erythrocephala* (экстенсивность инвазии (ЭИ) – 8,6 %) и *W. equina* (ЭИ – 2,1 %). Отмечено, что в основном подвергаются изменениям жировое тело особи, а также покровы, гонады и нервная система [49].

В Беларуси отмечена инфицированность мошек всех поколений, обитающих в водотоках микроспоридиями. Пораженных особей изучаемых членистоногих обнаруживали на протяжении всего сезона, но максимальную численность регистрировали во второй половине лета. Установлено, что путь проникновения микроспоридий в организм мошек пероральный, а локализация в основном в жировом теле, где происходит развитие как облигатного внутриклеточного паразита. Визуально пораженные особи мошек отличаются беловато-жёлтым цветом брюшка и увеличенными размерами, через кутикулу просвечиваются бесформенные белые, кремовые или розовые скопления. Отмечена зависимость инфицирования личинок мошек от возраста – чем старше, тем более выраженная у них патология. Поврежденные личинки не переходят к следующей стадии метаморфоза, слабо удерживаются на субстрате и легко уносятся потоком воды [50].

Паразитами мошек в Белорусском Поозерье также являются нематоды мермитиды *Mermithidae* Braun, 1883, которые способны заражать личинок 6 видов: *W. equina; Simulium* (*Wilhelmia*) *lineatum* Meigen, 1804*; B. erythrocephala; Arg. noelleri; Sim. promorsitans и Sim. morsitans*. Наиболее часто заражаются личинки *B. erythrocephala* (ЭИ около 10 %). Единичные случаи паразитирования зарегистрированы у *Arg. noelleri* (ЭИ 0,4 %). Отмечено, что некоторые особи были поражены одновременно несколькими нематодами, при

этом паразиты локализовались в брюшном отделе тела личинки и просматривались через кутикулу хозяина, а личинки мошек при этом были крупнее здоровых в 1,5−2,0 раза [50].

Биоакарициды. Микроскопические грибы способны регулировать численность иксодовых клещей – переносчиков возбудителей трансмиссивных болезней. Наиболее перспективными биоакарицидами являются препараты на основе энтомопатогенных грибов *M. anisopliae, B. bassiana,* а также микромицеты из рода *Cordyceps* Fr., 1818 и других видов для сокращения численности иксодовых клещей *Ixodes ricinus* Linnaeus, 1758, *Ixodes scapularis* Say, 1821*, Dermacentor variabilis* Say, 1821*, Dermacentor reticulatus* Fabricius, 1794 *и Rhipicephalus sanguineus* Latreille, 1806. Известно, что применение микоакарицидов в биотопах иксодид способствует гибели 87–96 % особей через три недели и 53–74 % через пять недель после обработки. Предполагается, что применение штамма *M. anisopliae* F52 может стать ещё одним инструментом интегрированного подхода к борьбе с иксодовыми клещами в жилом ландшафте. Отмечено, что испытанные микоакарициды не показали достаточной эффективности против таёжного клеща *Ixodes persulcatus* Schulze, 1930 [51].

Проведены испытания двух штаммов энтомопатогенного гриба *B. bassiana sp*. и одного штамма *Cordyceps sinensis sp*. (Berk.) Sacc., 1878 против имаго иксодид родов *Dermacentor* и *Ixodes*. По скорости воздействия используемые биоакарициды значительно отличались. Так, при применении суспензии на основе *B. bassiana sp.* гибель клещей наблюдали с шестых суток эксперимента. Отмечено, что *C. sinensis sp*. действовал медленнее и гибель иксодид начиналась с 12 суток. Абсолютная гибель иксодовых клещей достигнута на 20 сутки при применении суспензии, содержащей микромицеты *C. sinensis sp.,* полученной за одни сутки до эксперимента[4].

Для применения в колониях пчел против клещей-паразитов рекомендованы препараты на основе инкапсулированных в пористые микросферы крахмала растительных масел (гвоздики, орегано, камфоры) [52].

Для борьбы с большой восковой молью (*Galleria mellonella* Linnaeus, 1758) разработан опытный образец средства «Антигаллерин» (Красноярский ГАУ, Россия) на основе штамма *B. thuringiensis* 846-Bt (патент № RCAM 00045), обладающий высокой энтомопатогенной активностью [53].

Для повышения результативности биопестицидов необходимы дополнительные исследования, которые позволят минимизировать их недостатки и усилить действие. Для подбора наиболее эффективных микроорганизмов необходимы генетические исследования, позволяющие выявить наличие генов секретируемых белков и кластеров генов вторичных метаболитов и их активация различными методами, а также экстракция метаболитов микромицетов, их анализ различными методами хроматографии и масс-спектрометрии. Для активизации молчащих генов целесообразно испытание различных составов питательных сред, совместное культивирование с другими микроорганизмами или клетками насекомых, модификация регуляторных белков, гетерологичная экспрессия и другие. В продолжение исследований по разработке новых биорациональных инсектицидов необходимы токсикологические исследования, определение механизма действия и разработка технологий повышения их эффективности: увеличение выхода в культуре (подбор сред и условий культивирования, метаболическая инженерия штаммов-продуцентов); получение более активных синтетических производных или аналогов; усовершенствование препаративных форм (например, форм с контролируемым высвобождением для относительно токсичных соединений) и методов применения (например, изучение эффектов синергизма или сенсибилизации при использовании с другими инсектицидами) [53].

Анализ результатов изучения эффективности применения биопестицидов в полевых условиях показал значительные перспективы для их внедрения в сельское хозяйство (табл.).

[4]Столбунова К. А., Охлопкова О. В., Теплякова Т. В. Биоакарициды - регуляторы численности переносчиков трансмиссивных заболеваний человека. VIII международная научно-практическая конференция молодых ученых: биофизиков, биотехнологов, молекулярных биологов и вирусологов – 2021: сб. тез. конф.и, проходившей в рамках площадки открытых коммуникаций OpenBio-2021, Наукоград Кольцово, 05–08 октября 2021 года. Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2021. С. 67–68.
URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_48028419_39116189.pdf EDN: ZTXPRX

Таблица – **Результаты изучения эффективности применения биопестицидов против насекомых и клещей в полевых условиях** /
Table – **Results of the study of biopesticide effectiveness against insects and ticks in the field**

Вид паразита / Type of parasite	*Основа биопестицида / Biopesticide basis*	*Форма применения, концентрация / Form of application, concentration*	*Эффективность, % / Effectiveness, %*
Насекомые / Insects			
Anopheles superpictus	*Datura stramonium*	Отвар / Decoction	21,1–57,4 [17]
Anopheles (личинки)	*Bacillus thuringiensis var. israelensis*	Гранулы, 2,86 % / Granules, 2.86 %	95,0–100,0 [27]
Chironomidae	*Verbascum densiflorum* Bertol.	Спиртовой раствор, 1,0 % / Alcohol solution, 1.0 %	100,0 [18, 19]
		Водный раствор, 0,5 % / Aqueous solution, 0.5 %	<60,0 [18, 19]
Periplaneta fuliginosa	Денсовирус BgDNV / Densovirus BgDNV	Аттрактант / Attractant	<70,0 [34]
Stomoxys calcitrans	*Heterorhabditis bacteriophora*	25, 50, 100, 150 и 200 нематод/особь / 25, 50, 100, 150 and 200 nematode/ individual	Личинки ≥ 90,0 / Larvae ≥ 90.0; Куколки 70,0-100,0 / Pupae 70.0-100.0 [36]
	Heterorhabditis. baujardi	200 нематод/особь / 200 nematode /individual	Имаго 96,7–100,0 / Adult 96.7–100.0 0 [36]
Musca domestica (личинки)	*Beauveria bassiana*	Сухой конидиальный состав 108 конидий/г / Dry conidial composition 108 conidia/g	43,0 [39]
		Капсулы / Capsules	30,6–54,8 [40]
		Эмульсия (на основе льняного масла) / Emulsion (based on linseed oil)	19,9–51,7 [40]
	Metarhizium anisopliae	Сухой конидиальный состав 108 конидий/г / Dry conidial composition 108 conidia/g	63,0 [40]
Musca domestica (имаго)	*Beauveria bassiana*	Аттрактант / Attractant	65,0–100,0 [40]
		Капсулы / Capsules	100,0 [40]
Клещи / Ticks			
Ixodes ricinus	*Metarhizium anisopliae, Beauveria bassiana, Cordyceps*	-	53,0–96,0 [51]
Ixodes scapularis			
Dermacentor variabilis			
Dermacentor reticulatus			
Rhipicephalus sanguineus			

Заключение. Основным преимуществом инсектицидов биологического происхождения является направленность на целевого вредителя и отсутствие влияния на полезные организмы. Именно поэтому их можно использовать в природоохранных зонах, болотных угодьях и других местах, где есть водоемы. Для борьбы с паразитическими членистоногими в сельском хозяйстве целесообразно использовать биоинсектициды растительного, бактериального, вирусного и грибкового происхождения.

Так, применение отвара дурмана обыкновенного (*D. stramonium)* снижает численность имаго комаров *An. superpictu,* а спиртовой

раствор коровяка густоцветкового *(V. Densiflórum)* обладает выраженным инсектицидным действием против личинок комаров семейства Chironomidae. Бактерии *B. thuringiensis* активны против личинок комнатных мух *M. domestica*, комаров рода *Anopheles*, видов *C. quinquefasciatus*, *C. pipiens* и большой восковой моли (огневки) *G. mellonella*. Применение составов, содержащих денсовирус Densovirinae дымчато-коричневого таракана (*P. Fuliginosa)* эффективно для борьбы с рыжим, американским и чёрным тараканами. Энтомопатогенные нематоды рода *Heterorhabditis* (*Heterorhabditis bacteriophora* и *H. baujardi*) губительны для предимагильных стадий осенней жигалки *S. calcitrans,* а *Mermithidae* – для мошек. Применение микромицетов *B. thuringiensis* subsp. *aizawai* и *B. thuringiensis* subsp. *thuringiensis* эффективно в отношении насекомых отрядов Lepidoptera, Coleoptera, Hymenoptera, Diptera.

Использование приманок, содержащих конидии *M. anisopliae* и *B. bassiana* способствует регуляции численности личинок и имаго мух *M. domestica, S. calcitrans* и постельных клопов *C. lectularius*. Микроспоридии энтомопатогенного гриба *C. simulii* губительны для мошек видов *B. erythrocephala, Sch. pusilla, W. equina, Od. ornata, Arg. noelleri, Sim. rostratum, Sim. morsitans, Sim. paramorsitans u Sim. promorsitans*. Для сокращения численности иксодовых клещей *I. ricinus, I. scapularis, D. variabilis, D. reticulatus u Rh. sanguineus* эффективны биоакарициды на основе *M. anisopliae, B. bassiana*.

Рынок биопестицидов и биоконтролирующих агентов постоянно растет и имеет значительные перспективы для применения в агропромышленном комплексе. Расширение спектра отраслей, использующих биологические средства защиты, будет способствовать развитию зеленой экономики. В перспективе применение биопестицидов станет востребованным и частично заменит синтетические вещества с длительным остаточным инсектицидным и акарицидным действием, высокой токсичностью в сельском хозяйстве при защите растений и животных от паразитов, а также в медицине при противоэпидемиологических мероприятиях.

Список литературы

1. Борисова Е. Е. Анализ вредного воздействия пестицидов на биоту и здоровье человека, организационные основы решения проблемы. Евразийское пространство: экономика, право, общество. 2024;(1):7–10. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=60018509 EDN: SABKGV

2. Жемчужин С. Г. Биопестициды: открытие, изучение и перспективы применения. Агрохимия. 2014;(3):90–96. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=21481696 EDN: SCCEOT

3. Догадина М. А., Правдюк А. И., Криворотова Е. И. Вызовы и тренды рынка биопестицидов. Вестник аграрной науки. 2024;(2(107)):40–48. DOI: https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2024.2.40 EDN: EYIHVB

4. Штерншис М. В. Тенденции развития биотехнологии микробных средств защиты растений в России. Вестник Томского государственного университета. Биология. 2012;(2(18)):92–100. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=17772678 EDN: OYXXLJ

5. Франк Р. И., Кищенко В. И. Биопрепараты в современном земледелии. Защита и карантин растений. 2008;(4):30–32. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=13794717 EDN: LPWPWJ

6. Догадина М. А., Таракин А. В., Игнатова Г. А., Степанова Е. И., Велкова Н. И., Косаточкина М. Ю., Правдюк А. И., Криворотова Е. И. Аспекты снижения пестицидной нагрузки на экосистемы. Вестник аграрной науки. 2022;(5(98)):107–113. DOI: https://doi.org/10.17238/ISSN2587-666X.2022.5.107 EDN: UCJUZR

7. Хамидулина Х. Х., Рабикова Д. Н. Зеленые пестициды (преимущества и проблемы внедрения). Токсикологический вестник. 2020;(3):53–56. DOI: https://doi.org/10.36946/0869-7922-2020-3-53-56 EDN: BXOPQP

8. Хузин Д. А., Юсупов С. А., Ерошин А. И., Тарасов Е. Ю., Потехина Р. М., Тремасова А. М. Роль сапрофитных и условно-патогенных микроорганизмов в возникновении и распространении оппортунистических инфекций крупного рогатого скота. Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н. Э. Баумана. 2022;(252(4)):267–272. DOI: https://doi.org/10.31588/2413_4201_1883_4_252_267 EDN: FUDWCO

9. Сухарева Л. В., Кузнецова М. М. Направления использования биопрепаратов в растениеводстве. Известия Дагестанского ГАУ. 2023;(3(19)):55–63. DOI: https://doi.org/10.52671/26867591_2023_3_55 EDN: EQNBFC

10. Жемчужин С. Г., Спиридонов Ю. Я., Босак Г. С. Биопестициды: современное состояние проблемы. Агрохимия. 2019;(11):77–85. DOI: https://doi.org/10.1134/S0002188119110140 EDN: EEUSJB

11. Ayilara M. S., Adeleke B. S., Akinola S. A., Fayose C. A., Adeyemi U. T., Gbadegesin L. A. et al. Biopesticides as a promising alternative to synthetic pesticides: A case for microbial pesticides, phytopesticides, and nanobiopesticides. Frontiers in Microbiology. 2023;14:1040901. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1258968

12. Мишуковская Г. С., Шелехов Д. В., Гиниятуллин М. Г., Смольникова Е. А. Действие фунгицида Фитоспорин-АС,Ж на медоносных пчел. Пчеловодство. 2022;(6):18–20. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=49241610 EDN: ZVETNN

13. Долженко В. И., Лаптиев А. Б. Современный ассортимент средств защиты растений: биологическая эффективность и безопасность. Плодородие. 2021;(3(120)):71–75. DOI: https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.120.13 EDN: ZUQONQ

14. Монастырский О. А. Биопрепараты: типы, рынки в России и в других странах. Агрохимия. 2019;(11):86–90. DOI https://doi.org/10.1134/S0002188119110085 EDN: QCWVZL

15. Бизюкова О. В. Обзор мирового рынка микробиопрепаратов. Защита и карантин растений. 2012;(3):9–12. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=17715943 EDN: OXRQEF

16. Daraban G. M., Hlihor R. M., Suteu D. Pesticides vs. Biopesticides: From Pest Management to Toxicity and Impacts on the Environment and Human Health. Toxics. 2023;11(12):983. DOI: https://doi.org/10.3390/toxics11120983

17. Хабиров З., Кадамов Д. С., Искандаров Ф. М., Назиров В. К., Худоиев Х. У. Применение биопестицидов растительного происхождения против кровососущих комаров. Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение биологических и медицинских наук. 2013;(2(183)):17–26.
Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=20900476 EDN: RPJMQP

18. Астарханова Т. С., Астарханов И. Р., Абасова Т. И., Алибалаев Д. А. Инсектицидные свойства и эффективность растительных экстрактов. Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса. 2025;(2(64)):12–16. DOI: https://doi.org/10.32935/2221-7312-2025-64-2-12-16 EDN: KOLTNL

19. Муковоз П. П., Торжкова О. А., Валиуллин Л. Р., Картабаева Б. Б., Горбенко А. Д., Севостьянов М. А. Разработка инсектицидных композиций на основе пиретринов и природных дибензооксоланов, содержащихся в растительных и эфирных маслах. Вестник аграрной науки. 2023;(6(105)):44–47.
DOI: https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2023.6.44 EDN: ZINRBQ

20. Borges S., Alkassab A. T., Collison E., Hinarejos S., Jones B., McVey E. et al. Overview of the testing and assessment of effects of microbial pesticides on bees: strengths, challenges and perspectives. Apidologie. 2021;52:1256–1277. DOI: https://doi.org/10.1007/s13592-021-00900-7

21. Kachhawa D. Microorganisms as a Biopesticides. Journal of Entomology and Zoology Studies. 2017;3:468–473.

22. Гиниятуллин М. Г., Бахтиярова С. М., Проскурина Т. А. Эффективность действия биопрепаратов на пчел. Пчеловодство. 1996;(5):27–28.

23. Гиниятуллин М. Г., Шелехов Д. В., Смольникова Е. А., Науразбаева А. И., Фисенко Н. В. Хозяйственно полезные признаки пчелиных семей при использовании пробиотиков нового поколения. В кн.: Среднерусская порода медоносных пчёл в стратегии развития мирового пчеловодства. Киров: ФАНЦ Северо-Востока, 2019. С. 34–39.

24. Van Driesche R., Hoddle M., Center T. Control of pests and weeds by An Introduction to Biological Control. Blackwell, Malden, MA & Oxford, 2008, 473 p. DOI: https://doi.org/10.14411/eje.2009.038

25. Mnif I., Ghribi D. Potential of bacterial derived biopesticides in pest management. Crop Protection. 2015;77:52–64. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.07.017

26. Hall F. R., Menn J. J. Biopesticides Use and Delivery. Humana Press Inc., 1999. 626 p.

27. Queiroz P. R., Posso M. C., Martins É. S., Grynberg P., Togawa R., Gomes R. MonneratIdentification of cry genes in Bacillus thuringiensis by multiplex real-time PCR. Journal of Microbiological Methods. 2023:205:106665. DOI https://doi.org/10.1016/j.mimet.2022.106665

28. Nascimento T. A., Paes M. J., Valicente F. H., De Carvalho Queiroz M. M. Bioactive Potential of Some *Bacillus thuringiensis* Strains from Macapá, Amazon, Brazil, Against the Housefly *Musca domestica* (Diptera: Muscidae) Under Laboratory Conditions. Insects. 2025;16(1):27. DOI: https://doi.org/10.3390/insects16010027

29. Якушев А. В., Хуснетдинова Т. И., Глухова А. А., Бойкова Ю. В. Поиск потенциальных компонентов биопестицидов среди бактерий, выделенных из кишечников почвенных беспозвоночных животных и их кормовых субстратов - ботвы картофеля и лиственного опада. Агрохимический вестник. 2024;(2):66–71.
DOI: https://doi.org/10.24412/1029-2551-2024-2-012 EDN: AEONIW

30. Берестецкий А. О., Леднев Г. Р., Ху Ц. Перспективные подходы к поиску метаболитов грибов для борьбы с вредными членистоногими. Вестник защиты растений. 2021;104(1):6–27.
DOI: https://doi.org/10.31993/2308-6459-2021-104-1-14963 EDN: NDPNVD

31. Шухалова А. Г., Тимофеев С. А., Долгих В. В. Высоковирулентные и специфичные биопестициды на основе генетически модифицированных энтомопатогенных грибов. Международный сельскохозяйственный журнал. 2024;(2(398)):188–191. DOI: https://doi.org/10.55186/25876740_2024_67_2_188 EDN: LPGZIU

32. Stingaci A. Using of entomoptogenic baculovirus pesticides for biological controls of pest insects in the republic of Moldova. Agrarian Science. 2019:S2:142–144. DOI: https://doi.org/10.32634/0869-8155-2019-326-2-142-144 EDN: IPFFYS

33. Mota–Sanchez D., Wise J. C. The Arthropod Pesticide Resistance Database. Michigan State University, 2024. [Электронный ресурс]. URL: http://www.pesticideresistance.org (дата обращения: 27.12.2024).

34. Кривонос К. С., Еремина О. Ю., Олифер В. В. Эффективность приманки на основе денсовируса PfDNV в отношении синантропных тараканов. Дезинфекционное дело. 2024;(2(128)):22–27.
DOI: https://doi.org/10.35411/2076-457X-2024-2-22-27 EDN: WZMJKO

35. Кривонос К. С. Мониторинг резистентности к инсектицидам популяций постельных клопов России. Дезинфекционное дело. 2019;(2(108)):51–63. DOI: https://doi.org/10.35411/2076-457X-2019-2-48-61 EDN: WFAGXK

36. Leal L. C. S. R., Monteiro C. M. O., Mendonça A. É., Bittencourt V. R. E. P., Bittencourt A. J. Potential of entomopathogenic nematodes of the genus Heterorhabditis for the control of Stomoxys calcitrans (Diptera: Muscidae). Revista Brasileira de Parasitologia Veterinária. 2017;26(4):451–456. DOI: https://doi.org/10.1590/S1984-29612017065

37. Liu H., Cupp E. W., Micher K. M., Guo A., Liu N. Insecticide resistance and cross-resistance in Alabama and Florida strains of Culex quinquefasciatus [correction]. Journal of Medical Entomology. 2004;41(3):408–413.
DOI: https://doi.org/10.1603/0022-2585-41.3.408

38. Хабиров З., Кадамов Д. С., Амиркулов Х., Мирзоев Н. М., Искандаров Ф. М. Применение биологических методов борьбы с кровососущими комарами в Таджикистане. Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение биологических и медицинских наук. 2013;(1(182)):27–34.
Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20170592 EDN: QZKFNZ

39. Mishra S., Kumar P., Malik A., Satya S. Adulticidal and larvicidal activity of Beauveria bassiana and Metarhizium anisopliae against housefly, *Musca domestica* (Diptera: Muscidae), in laboratory and simulated field bioassays. Parasitology Research. 2011;108(6):1483–1492. DOI: https://doi.org/10.1007/s00436-010-2203-5

40. Mishra S., Kumar P., Malik A. Preparation, characterization, and insecticidal activity evaluation of three different formulations of Beauveria bassiana against *Musca domestica*. Parasitology Research. 2013;112(10):3485–3495.
DOI: https://doi.org/10.1007/s00436-013-3529-6

41. Baker D., Rice S., Leemon D., Godwin R., James P. Development of a Mycoinsecticide Bait Formulation for the Control of House Flies, *Musca domestica* L. Insects. 2020;11(1):47. DOI: https://doi.org/10.3390/insects11010047

42. White R. L., Geden Ch. J., Kaufman Ph. E., Johnson D. Comparative Virulence of Metarhizium anisopliaeand Four Strains of Beauveria bassiana Against House Fly (Diptera: Muscidae) Adults With Attempted Selection for Faster Mortality. Journal of Medical Entomology. 2021;58(4):1771–1778. DOI: https://doi.org/10.1093/jme/tjab027

43. Кривонос К. С., Еремина О. Ю., Олифер В. В. Применение микоинсектицидов для сокращения численности комнатной мухи *Musca domestica* L. (Diptera: Muscidae). Дезинфекционное дело. 2024;(2(128)):28–36.
DOI: https://doi.org/10.35411/2076-457X-2024-2-28-36 EDN: CGVZKV

44. Шустова А. А., Удавлиев Д. И., Башнин О. И., Кущ И. В., Попов Н. И., Гуляева Ю. А. Производственные испытания эффективности препарата «Битоксибациллин» в Липецкой области на птицефабрике «Новоникольская». Ветеринария, зоотехния и биотехнология. 2023;(5):27–33. DOI: https://doi.org/10.36871/vet.zoo.bio.202305004
EDN: MSQCIZ

45. Moraes A. P. R., Angelo I. C., Fernandes É. K. K., Bittencourt V. R. E. P., Bittencourt A. J. Virulence of Metarhizium anisopliae to eggs and immature stages of Stomoxys calcitrans. Animal Biodiversity and Emerging Diseases Prediction and Prevention. 2008;1149(1):384–387. DOI: https://doi.org/10.1196/annals.1428.008

46. Lysyk T. J., Kalischuk-Tymensen L. D., Selinger L. B. Mortality of adult Stomoxys calcitrans fed isolates of Bacillus thuringiensis. Journal of Economic Entomology. 2012;105(5):1863–1870.
DOI: https://doi.org/10.1603/0022-2585-41.3.408

47. Мишуковская Г. С., Шелехов Д. В., Гиниятуллин М. Г., Андреева А. В. Оценка острой токсичности биоинсектицида Туринбаш-Ж для пчелы медоносной *Apis mellifera mellifera* L. Аграрная наука. 2023;(4):21-26.
DOI: https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-369-4-21-26 EDN: MRTODK

48. Кривонос К. С., Еремина В. В., Олифер О. Ю. Перспективы применения энтомопатогенных грибов для борьбы с постельными клопами. Дезинфекционное дело. 2023;(4(126)):27–33.
DOI: https://doi.org/10.35411/2076-457X-2023-4-27-33 EDN: EMSDBB

49. Abdelghany T. M. Entomopathogenic fungus and their role in biological control. Foster City: OMICS Group eBooks, 2015. 46 p.
URL: https://www.researchgate.net/publication/328538178_Entomopathogenic_Fungi_And_Their_Role_In_Biological_Control

50. Довнар Д. В., Войтка Д. В., Каплич В. М. Биологические агенты контроля численности кровососущих мошек (Diptera: simuliidae) в водотоках Белорусского Поозерья. Экология и животный мир. 2018;(2):28–33.
Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38538722 EDN: RCIQMG

51. Кривонос К. С., Еремина О. Ю., Олифер В. В. Перспективы применения энтомопатогенных грибов для сокращения численности иксодовых клещей (Ixodida: Ixodidae). Дезинфекционное дело. 2023;(2(124)):44–53.
DOI: https://doi.org/10.35411/2076-457X-2023-2-44-53 EDN: KKGBCB

52. Glenn G. M., Klamczynski A. P., Woods D. F., Chiou B., Orts W. J., Imam S. H. Encapsulation of plant oils in porous starch microspheres. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2010;58(7):4180–4184.
DOI: https://doi.org/10.1021/jf9037826

53. Желябовская Д. А., Остякова М. Е., Шульга И. С., Лаврушина Л. А., Коноплев В. А., Почтарь В. А. Исследование острой токсичности экспериментального биоинсектицида "Антигаллерин" на кроликах. Вестник КрасГАУ. 2017;(9(132)):30–34. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30103858 EDN: ZITVIX

References

1. Borisova E. E. Analysis of the harmful impact of pesticides on biota and human health, organizational framework for solving the problem. *Evraziyskoye prostranstvo: ekonomika, pravo, obshchestvo*. 2024;(1):7–10. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=60018509

2. Zhemchuzhin S. G. Biopesticides: discovery, study, and possible applications. *Agrokhimiya*. 2014;(3):90–96. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=21481696

3. Dogadina M. A., Pravdyuk A. I., Krivorotova E. I. Challenges and trends of the biopesticide market. *Vestnik agrarnoy nauki* = Bulletin of agrarian science. 2024;(2(107)):40–48. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2024.2.40

4. Shternshis M. V. Trends of microbial pesticides biotechnology developed for plant protection in Russia. *Vestnik Tomskogo gosudar-stvennogo universiteta. Biologiya* = Tomsk State University Journal of Biology. 2012;(2(18)):92–100. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=17772678

5. Frank R. I., Kishchenko V. I. Biological products in modern agriculture. *Zashchita i karantin rasteny*. 2008;(4):30–32. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=13794717

6. Dogadina M. A., Tarakin A. V., Ignatova G. A., Stepanova E. I., Velkova N. I., Kosatochkina M. Yu., Pravdyuk A. I., Krivorotova E. I. Aspects of reducing pesticide load on ecosystems. *Vestnik agrarnoy nauki* = Bulletin of agrarian science. 2022;(5(98)):107–113. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.17238/ISSN2587-666X.2022.5.107

7. Khamidulina Kh. Kh., Rabikova D. N. Green pesticides (advantages and problems of implementation). *Toksikologichesky vestnik* = Toxicological Review. 2020;(3):53–56. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.36946/0869-7922-2020-3-53-56

8. Khuzin D. A., Yusupov S. A., Yeroshin A. I., Tarasov E. Yu., Po-tekhina R. M., Tremasova A. M. The role of saprophytic and conditionally pathogenic microorganisms in the occurrence and spread of opportunistic infections of cattle. *Ucheniye zapiski Kazanskoy gosudarstvennoy akademii veterinarnoy meditsini im. N. E. Baumana* = Scientific Notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine. 2022;(252(4)):267–272. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.31588/2413_4201_1883_4_252_267

9. Sukhareva L. V., Kuznetsova M. M. Directions for the use of biopreparations in crop production. *Izvestiya Dagestanskogo GAU* = Daghestan GAU Proceedings. 2023;(3(19)):55–63. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.52671/26867591_2023_3_55

10. Zhemchuzhin S. G., Spiridonov Yu. Ya., Bosak G. S. Biopesticides: modern condition of the problem (digest of publications for 2012–2017). *Agrokhimiya*. 2019;(11):77–85. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.1134/S0002188119110140

11. Ayilara M. S., Adeleke B. S., Akinola S. A., Fayose C. A., Adeyemi U. T., Gbadegesin L. A. et al. Biopesticides as a promising alternative to synthetic pesticides: A case for microbial pesticides, phytopesticides, and nanobiopesticides. Frontiers in Microbiology. 2023;14:1040901. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1258968

12. Mishukovskaya G. S., Shelekhov D. V., Giniyatullin M. G., Smolnikova E. A. Effect of the fungicide Fitosporin-AS, G on honeybees. *Pchelovodstvo*. 2022;(6):18–20. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=49241610

13. Dolzhenko V. I., Laptiev A. B. Modern range of plant protection means: biological efficiency and safety. *Plodorodiye*. 2021;(3(120)):71–75. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.120.13

14. Monastirsky O. A. Biologics: types, markets in Russia and in other countries. *Agrokhimiya*. 2019;(11):86–90. (In Russ.). DOI https://doi.org/10.1134/S0002188119110085

15. Bizyukova O. V. World microbiological preparations market survey. *Zashchita i karantin rasteny*. 2012;(3):9–12. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=17715943

16. Daraban G. M., Hlihor R. M., Suteu D. Pesticides vs. Biopesticides: From Pest Management to Toxicity and Impacts on the Environment and Human Health. Toxics. 2023;11(12):983. DOI: https://doi.org/10.3390/toxics11120983

17. Khabirov Z., Kadamov D. S., Iskandarov F. M., Nazirov V. K., Khudoiyev Kh. U. Use of bio-pesticidal plants against mosquitoes. *Izvestiya Akademii nauk Respubliki Tadzhikistan. Otdeleniye biologicheskikh i meditsinskikh nauk* = News of the National Academy of Sciences of Tajikistan. Department of Biological Sciences. 2013;(2(183)):17–26. (In Tajikistan). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=20900476

18. Astarkhanova T. S., Astarkhanov I. R., Abasova T. I., Alibalaev D. A. Insecticidal properties and effectiveness of plant extracts. *Teoreticheskiye i prikladniye problemi agropromishlennogo kompleksa* = Theoretical & Appliedapplied Problems of Agro-industryproblems of Agro-industry. 2025;(2(64)):12–16. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.32935/2221-7312-2025-64-2-12-16

19. Mukovoz P. P., Torzhkova O. A., Valiullin L. R., Kartabaeva B. B., Gorbenko A. D., Sevostyanov M. A. Development of insecticidal compositions based on pyrethrins and natural benzodioxolanes contained in vegetable and essential oils. *Vestnik agrarnoy nauki* = Bulletin of agrarian science. 2023;(6(105)):44–47. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2023.6.44

20. Borges S., Alkassab A. T., Collison E., Hinarejos S., Jones B., McVey E. et al. Overview of the testing and assessment of effects of microbial pesticides on bees: strengths, challenges and perspectives. Apidologie. 2021;52:1256–1277. DOI: https://doi.org/10.1007/s13592-021-00900-7

21. Kachhawa D. Microorganisms as a Biopesticides. Journal of Entomology and Zoology Studies. 2017;3:468–473.

22. Giniyatullin M. G., Bakhtiyarova S. M., Proskurina T. A. Efficiency of action of biological preparations on bees. *Pchelovodstvo*. 1996;(5):27–28. (In Russ.).

23. Giniyatullin M. G., Shelekhov D. V., Smolnikova E. A., Naurazbayeva A. I., Fisenko N. V. Economically useful traits of bee colonies by using probiotics of a new generation. In: The Central Russian honey bee breed in the development strategy of global beekeeping. Kirov: *FANTs Severo-Vostoka*, 2019. pp. 34–39.

24. Van Driesche R., Hoddle M., Center T. Control of pests and weeds by An Introduction to Biological Control. Blackwell, Malden, MA & Oxford, 2008, 473 p. DOI: https://doi.org/10.14411/eje.2009.038

25. Mnif I., Ghribi D. Potential of bacterial derived biopesticides in pest management. Crop Protection. 2015;77:52–64. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.07.017

26. Hall F. R., Menn J. J. Biopesticides Use and Delivery. Humana Press Inc., 1999. 626 p.

27. Queiroz P. R., Posso M. C., Martins É. S., Grynberg P., Togawa R., Gomes R. MonneratIdentification of cry genes in Bacillus thuringiensis by multiplex real-time PCR. Journal of Microbiological Methods. 2023:205:106665. DOI https://doi.org/10.1016/j.mimet.2022.106665

28. Nascimento T. A., Paes M. J., Valicente F. H., De Carvalho Queiroz M. M. Bioactive Potential of Some *Bacillus thuringiensis* Strains from Macapá, Amazon, Brazil, Against the Housefly *Musca domestica* (Diptera: Muscidae) Under Laboratory Conditions. Insects. 2025;16(1):27. DOI: https://doi.org/10.3390/insects16010027

29. Yakushev A. V., Khusnetdinova T. I., Glukhova A. A., Boykova Yu. V. Search for potential components of biopesticides among bacteria isolated from the intestines of soil invertebrates and their food substrates - potato leaves and leaf litter. *Agrokhimichesky vestnik* = Agrochemical Herald. 2024;(2):66–71. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24412/1029-2551-2024-2-012

30. Berestetsky A. O., Lednev G. R., Hu Q. Promising approaches to the search for fungal metabolites for management of arthropod pests. *Vestnik zashchiti rasteny* = Plant Protection News. 2021;104(1):6–27. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.31993/2308-6459-2021-104-1-14963

31. Shukhalova A. G., Timofeyev S. A., Dolgikh V. V. Highly virulent and specific biopesticides based on genetically modified entomopathogenic fungi. *Mezhdunarodny selskokhozyaystvenny zhurnal* = International Agricultural Journal. 2024;(2(398)):188–191. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.55186/25876740_2024_67_2_188

32. Stingaci A. Using of entomoptogenic baculovirus pesticides for biological controls of pest insects in the republic of Moldova. Agrarian Science. 2019:S2:142–144. DOI: https://doi.org/10.32634/0869-8155-2019-326-2-142-144

33. Mota–Sanchez D., Wise J. C. The Arthropod Pesticide Resistance Database. Michigan State University, 2024. Available at: http://www.pesticideresistance.org (accessed: 27.12.2024).

34. Krivonos K. S., Eremina O. Yu., Olifer V. V. Efficacy of bait based on PfDNV densovirus against synanthropic cockroaches. *Dezinfektsionnoye delo* = Disinfection Affairs. 2024;(2(128)):22–27. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.35411/2076-457X-2024-2-22-27

35. Krivonos K. S. Insecticide resistance monitoring in bed bug populations of Russia. *Dezinfektsionnoye delo* = Disinfection Affairs. 2019;(2(108)):51–63. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.35411/2076-457X-2019-2-48-61

36. Leal L. C. S. R., Monteiro C. M. O., Mendonça A. É., Bittencourt V. R. E. P., Bittencourt A. J. Potential of entomopathogenic nematodes of the genus Heterorhabditis for the control of Stomoxys calcitrans (Diptera: Muscidae). Revista Brasileira de Parasitologia Veterinária. 2017;26(4):451–456. DOI: https://doi.org/10.1590/S1984-29612017065

37. Liu H., Cupp E. W., Micher K. M., Guo A., Liu N. Insecticide resistance and cross-resistance in Alabama and Florida strains of Culex quinquefasciatus [correction]. Journal of Medical Entomology. 2004;41(3):408–413. DOI: https://doi.org/10.1603/0022-2585-41.3.408

38. Khabirov Z., Kadamov D. S., Amirkulov Kh., Mirzoyev N. M., Iskandarov F. M. Tests on application of biological methods on mosquitoes control in Tajikistan. *Izvestiya Akademii nauk Respubliki Tadzhikistan. Otdeleniye biologicheskikh i meditsinskikh nauk* = News of the National Academy of Sciences of Tajikistan. Department of Biological Sciences. 2013;(1(182)):27–34. (In Tajikistan). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20170592

39. Mishra S., Kumar P., Malik A., Satya S. Adulticidal and larvicidal activity of Beauveria bassiana and Metarhizium anisopliae against housefly, *Musca domestica* (Diptera: Muscidae), in laboratory and simulated field bioassays. Parasitology Research. 2011;108(6):1483–1492. DOI: https://doi.org/10.1007/s00436-010-2203-5

40. Mishra S., Kumar P., Malik A. Preparation, characterization, and insecticidal activity evaluation of three different formulations of Beauveria bassiana against *Musca domestica*. Parasitology Research. 2013;112(10):3485–3495. DOI: https://doi.org/10.1007/s00436-013-3529-6

41. Baker D., Rice S., Leemon D., Godwin R., James P. Development of a Mycoinsecticide Bait Formulation for the Control of House Flies, *Musca domestica* L. Insects. 2020;11(1):47. DOI: https://doi.org/10.3390/insects11010047

42. White R. L., Geden Ch. J., Kaufman Ph. E., Johnson D. Comparative Virulence of Metarhizium anisopliaeand Four Strains of Beauveria bassiana Against House Fly (Diptera: Muscidae) Adults With Attempted Selection for Faster Mortality. Journal of Medical Entomology. 2021;58(4):1771–1778. DOI: https://doi.org/10.1093/jme/tjab027

43. Krivonos K. S., Yeremina O. Yu., Olifer V. V. Mycoinsecticides for controlling the house fly, *Musca domestica* L. (Diptera: Muscidae). *Dezinfektsionnoye delo* = Disinfection Affairs. 2024;(2(128)):28–36. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.35411/2076-457X-2024-2-28-36

44. Shustova A. A., Udavliyev D. I., Bashnin O. I., Kushch I. V., Popov N. I., Gulyayeva Yu. A. Production trials of Bitoxybacillin effectiveness in Lipetsk region at Novonikolskaya poultry farm. *Veterinariya, zootekhniya i biotekhnologiya* = Veterinary Medicine, Zootechnics and Biotechnology. 2023;(5):27–33. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.36871/vet.zoo.bio.202305004

45. Moraes A. P. R., Angelo I. C., Fernandes É. K. K., Bittencourt V. R. E. P., Bittencourt A. J. Virulence of Metarhizium anisopliae to eggs and immature stages of Stomoxys calcitrans. Animal Biodiversity and Emerging Diseases Prediction and Prevention. 2008;1149(1):384–387. DOI: https://doi.org/10.1196/annals.1428.008

46. Lysyk T. J., Kalischuk-Tymensen L. D., Selinger L. B. Mortality of adult Stomoxys calcitrans fed isolates of Bacillus thuringiensis. Journal of Economic Entomology. 2012;105(5):1863–1870. DOI: https://doi.org/10.1603/0022-2585-41.3.408

47. Mishukovskaya G. S., Shelekhov D. V., Giniyatullin M. G., Andreeva A. V. Estimation of acute toxicity of bioinsecticide Turinbash-G for honey bee *Apis mellifera mellifera* L. *Agrarnaya nauka* = Agrarian science. 2023;(4):21–26. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-369-4-21-26

48. Krivonos K. S., Eremina V. V., Olifer O. Yu. Olifer use of entomopathogenic fungi against bed bugs. *Dezinfektsionnoye delo* = Disinfection Affairs. 2023;(4(126)):27–33. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.35411/2076-457X-2023-4-27-33

49. Abdelghany T. M. Entomopathogenic fungus and their role in biological control. Foster City: OMICS Group eBooks, 2015. 46 p.
URL: https://www.researchgate.net/publication/328538178_Entomopathogenic_Fungi_And_Their_Role_In_Biological_Control

50. Dovnar D. V., Voytka D. V., Kaplich V. M. Biological agents of control of the number of the blood-pressing cats (Diptera: simuliidae) in waterways of the belarusian lawner. *Ekologiya i zhivotny mir* = Ecology and Animal World. 2018;(2):28–33. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38538722

51. Krivonos K. S., Eremina O. Yu., Olifer V. V. Prospects for use of entomopathogenic fungi for the biocontrol of ixodid ticks (Ixodida: Ixodidae). *Dezinfektsionnoye delo* = Disinfection Affairs. 2023;(2(124)):44–53. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.35411/2076-457X-2023-2-44-53

52. Glenn G. M., Klamczynski A. P., Woods D. F., Chiou B., Orts W. J., Imam S. H. Encapsulation of plant oils in porous starch microspheres. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2010;58(7):4180–4184.
DOI: https://doi.org/10.1021/jf9037826

53. Zhelyabovskaya D. A., Ostyakova M. E., Shulga I. S., Lavrushina L. A., Konoplev V. A., Pochtar V. A. The research of acute toxicity of experimental bioinsecticide "Antigallerin" in rabbits. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU. 2017;(9(132)):30–34. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30103858

Вклад авторов: Домацкий В. Н. – концепция и план исследования, анализ данных, подготовка рукописи; Глазунова Л. А. – анализ данных, подготовка рукописи; Глазунов Ю. В. – концепция и план исследования, анализ данных.

Сведения об авторах

Домацкий Владимир Николаевич, доктор биол. наук, главный научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт ветеринарной энтомологии и арахнологии – филиал ФГБНУ Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Институтская, 2, Тюмень, Российская Федерация, 625041, e-mail: vniivea@mail.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3944-0121

✉ **Глазунова Лариса Александровна,** доктор вет. наук, профессор, ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», д. 6, ул. Володарского, г. Тюмень, Российская Федерация, 625003, e-mail: common@utmn.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4050-5903**, e-mail: larissa-tyumen@mail.ru

Глазунов Юрий Валерьевич, доктор вет. наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский институт ветеринарной энтомологии и арахнологии – филиал ФГБНУ Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Институтская, 2, Тюмень, Российская Федерация, 625041, e-mail: vniivea@mail.ru; зав. кафедрой, ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», д. 6, ул. Володарского, г. Тюмень, Российская Федерация, 625003,
e-mail: common@utmn.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6496-2450**

Author contributions: Domatsky V. N. – research concept and plan, data analysis, manuscript preparation;
Glazunova L. A. – data analysis, manuscript preparation; Glazunov Yu. V. – research concept and plan, data analysis.

Information about the authors

Vladimir N. Domatsky, DSc in Biological Science, chief researcher, All-Russian Scientific Research Institute of Veterinary Entomology and Arachnology – Division of Federal Research Centre Tyumen Scientific Centre of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institutskaya st., 2, Tyumen, Russian Federation, 625041, e-mail: vniivea@mail.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3944-0121**

✉ **Larisa A. Glazunova,** DSc in Veterinary Science, professor, University of Tyumen, 6, Volodarsky St., Tyumen, Russian Federation, 625003, e-mail: common@utmn.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4050-5903**,
e-mail: larissa-tyumen@mail.ru

Yuri V. Glazunov, DSc in Veterinary Science, leading researcher, All-Russian Scientific Research Institute of Veterinary Entomology and Arachnology – Division of Federal Research Centre Tyumen Scientific Centre of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institutskaya st., 2, Tyumen, Russian Federation, 625041, e-mail: vniivea@mail.ru; University of Tyumen, 2, Institutskaya St., Tyumen, Russian Federation, 625041, e-mail: common@utmn.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6496-2450

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.308–318
УДК 57.085.23:631.234:633.111

(cc) BY

Влияние продолжительности яровизации *in vitro* на рост и продуктивность озимых злаков в условиях фитотронно-тепличного комплекса

© 2026. О. В. Ткаченко✉, Н. В. Рязанцев, А. А. Беляева, Е. Е. Костина
ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова», г. Саратов, Российская Федерация

Фитотронно-тепличные комплексы активно применяются в селекции озимых культур. Сокращение периода яровизации растений, в том числе с привлечением культуры in vitro, позволит получать более одного поколения за календарный год. Цель исследования – изучить эффективность яровизации in vitro на 12 сортообразцах пшеницы и тритикале, в том числе двуручках, при круглогодичном выращивании растений в защищенном грунте. Продолжительность яровизации in vitro при t +4 ºС составляла 20, 30, 40, 50 и 60 суток. Растения высаживали в гидропонную установку и выращивали в условиях длинного дня (22 часа). Переход к генеративной фазе роста после 20 суток in vitro-яровизации наступил только у тритикале-двуручек (60 % растений сорта Валентин 90 формировали продуктивные побеги), для остальных сортов и линий требовалось не менее 50 суток, для сортов Зубр (тритикале) и Скипетр (пшеница) – 60 суток. Период от получения эмбриокультуры, яровизации, выращивания в гидропонной установке растений до получения семенного потомства длился у большинства сортов озимой пшеницы и тритикале-двуручек от 118 до 152 суток, у озимой тритикале – от 150 до 170 суток. У всех сортов и линий общее количество побегов, формирующихся на растении, значительно снижалось при увеличении продолжительности яровизации и приобретении способности к формированию продуктивных побегов. Озерненность колосьев в вариантах, где растения успешно прошли яровизацию, у тритикале составила в среднем 45 зерен в колосе, у пшеницы – 26–40 зерен.

Ключевые слова: *пшеница мягкая, тритикале, сорт двуручка, эмбриокультура, гидропонная установка, вегетационный период, селекция*

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в соответствии с Государственными планами научных исследований ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова» (тема № FRES-2025-0005).

Авторы благодарят доктора биол. наук Т. И. Дьячук (ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока») за предоставленные для исследования семена сортов и селекционных линий.

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку данной работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Ткаченко О. В., Рязанцев Н. В., Беляева А. А., Костина Е. Е. Влияние продолжительности яровизации *in vitro* на рост и продуктивность озимых злаков в условиях фитотронно-тепличного комплекса. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):308–318. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.308-318

Поступила в редакцию: 08.08.2025
Доработана после рецензирования: 10.10.2025
Принята к публикации: 25.03.2026
Опубликована онлайн: 27.04.2026

The effect of *in vitro* vernalization duration on the growth and productivity of winter cereals in a phytotron-greenhouse complex

© 2026. Oksana V. Tkachenko✉, Nikita V. Ryazantsev, Anna A. Belyaeva, Ekaterina E. Kostina
Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, Saratov, Russian Federation

Phytotron-greenhouse complexes are widely used in breeding winter crops. Reducing the period of plant vernalization, including the use of in vitro culture will make it possible to obtain more than one generation over the year. The aim of the study was to investigate the effectiveness of in vitro vernalization of 12 wheat and triticale variety samples including facultatives, during year-round cultivation of plants in protected soil. The duration of in vitro vernalization at t +4 °C was 20, 30, 40, 50 and 60 days. The plants were set out in a hydroponic installation and grown under long-day conditions (22 hours). Only in facultative triticale could the transition to the generative growth phase occur in the variant with 20 days of in vitro vernalization: productive shoots were formed in 60 % of the 'Valentin 90' cultivar plants. At least 50 days of in vitro vernalization were required for most cultivars and lines, 60 days were necessary for the 'Zubr' (triticale) and 'Skipetr' (wheat) cultivars.

The period from obtaining the embryo culture, vernalization, growing plants in a hydroponic installation to obtaining seed offspring lasted from 118 to 152 days for most cultivars of winter wheat and facultative triticale, and from 150 to 170 days for winter triticale. In all cultivars and lines, the total number of shoots formed on the plant significantly decreased with an increase in the duration of vernalization and the development of the capacity for productive shoot formation. The grain content of ears in the variants where the plants successfully underwent vernalization averaged 45 grains per ear for triticale and 26-40 grains per ear for wheat.

Keywords: *soft wheat, triticale, facultative cultivar, embryo culture, hydroponic system, vegetation period, plant breeding*

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the State research plans of the Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov (theme No. FRES-2025-0005).

The authors thank Taisiya I. Dyatchuk, Doctor of Biological Science (Federal Center of Agriculture Research of the South-East Region) for providing the seeds of cultivars and breeding lines for the study.

The authors also thank the reviewers for their contributions to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors stated that there was no conflict of interest.

For citation: Tkachenko O. V., Ryazantsev N. V., Belyaeva A. A., Kostina E. E. The effect of *in vitro* vernalization duration on the growth and productivity of winter cereals in a phytotron-greenhouse complex. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):308–318. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.308-318

Received: 08.08.2025 Accepted for publication: 25.03.2025
Revised: 10.10.2025 Published online: 27.04.2026

Злаки составляют основу рациона бóльшей части населения планеты. Пшеница – одна из важнейших сельскохозяйственных культур в России и мире. По данным Росстата[1], в 2024 г. озимая пшеница выращивалась на площади более 16 млн га. В Саратовской области площадь под этой культурой составляла более 1 млн га, уступая по этому показателю только подсолнечнику. Озимая тритикале занимает значительно меньшие площади – в 2024 г. в России высевалась на площади 77 тыс. га, в Саратовской области – порядка 1 тыс. га. При этом доля озимых культур среди всех зерновых ежегодно увеличивается, в том числе благодаря растущей урожайности, устойчивости к факторам среды и качеству зерна новых сортов. В настоящее время в Государственном реестре сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию[2], находится 469 сортов озимой пшеницы, из которых 115 – по 8-му Нижневолжскому региону. Сортов озимой тритикале зарегистрировано существенно меньше: всего 120, из них 27 – в 8-м регионе. Темпы селекции не только не ослабевают, но должны наращиваться для обеспечения потребностей производства в высокопродуктивных и адаптивных сортах, устойчивых к постоянно меняющемуся климату и патогенам.

Для ускорения селекционного процесса применяются различные технические решения и биотехнологические методы. Существенное ускорение процесса селекции достигается использованием сооружений защищенного грунта, в том числе фитотронно-тепличных комплексов (ФТК) [1]. Сокращения периода вегетации («Speed Breeding») добиваются изменением длины дня, интенсивности и качественного состава света, температуры и влажности воздуха, что позволяет получать за год до 5 репродукций у яровых и до 4 репродукций у озимых культур [2]. Условия ускоренного выращивания растений предложены для ряда важнейших сельскохозяйственных культур [1, 3, 4]. Методика выращивания может корректироваться в зависимости от видовых особенностей растений [5].

Озимые культуры отличаются длительным периодом вегетации, составляющим до 320–350 дней [6], и требуют яровизации при пониженных положительных температурах в сочетании с коротким днем. Яровизацию растений или набухших семян можно провести в климатокамерах при температуре от 0 до +2 °С [7]. Другим вариантом является проращивание гаметических зародышей на питательной среде в культуре *in vitro* с последующим выдерживанием проростков при пониженной температуре [8].

[1]Федеральная служба государственной статистики. Официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: https://ssl.rosstat.gov.ru/ (дата обращения: 01.08.2025).

[2]Государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию. Официальный сайт Госсроткомиссии. [Электронный ресурс]. URL: https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektsionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/ (дата обращения 01.08.2025)

Продолжительность яровизации в значительной степени зависит от генотипа растений и географического происхождения [9]. Сортам пшеницы разного происхождения для успешной яровизации проростков из семян может потребоваться от 30 до 60 суток воздействия пониженных температур [10]. У тритикале продолжительность яровизации проросших семян может составлять от 55 до 75 суток [7]. Возможность яровизации растений пшеницы и тритикале в культуре *in vitro* ранее отмечалась рядом авторов, но необходимая продолжительность процедуры не была установлена [8, 11].

Увеличения количества генераций озимых культур при круглогодичном выращивании в условиях искусственного климата можно достичь путем сокращения периодов яровизации и последующей вегетации до колошения, цветения и созревания семян. Метод эмбриокультуры *in vitro* («Embryo culture») незрелых зародышей позволяет не только провести яровизацию растений, но и исключить этапы созревания семян и периода послеуборочного покоя до получения следующего поколения. Необходимая продолжительность и условия яровизации растений *in vitro* для озимых злаков изучены недостаточно.

Цель исследований – изучить эффективность яровизации *in vitro* сортов и линий пшеницы, тритикале, в том числе двуручек, при круглогодичном выращивании растений в защищенном грунте.

Новизна исследования – установлены особенности влияния различной продолжительности яровизации растений пшеницы озимой, тритикале озимой и двуручек, полученных из зародышей в культуре *in vitro*, на переход в генеративную стадию развития, формирование морфологических и продуктивных признаков у растений в условиях ФТК. Полученные результаты будут использованы для разработки протокола ускорения селекционного процесса озимых злаков.

Материал и методы. Исследования проводили дважды в 2023-2024 и 2024-2025 гг. Объектами исследований являлись 4 сорта озимой пшеницы (Новоершовская, Губернатор Дона, Московская 40, Скипетр) и 8 сортов и линий гексаплоидной тритикале, из которых 4 озимые (сорт Георг, селекционные линии Л17, Л16, Л61) и 4 двуручки (сорта Зубр, Валентин 90, селекционные линии Л14, Л11). Материал для исследования, в том числе селекционные линии, предоставлен доктором сельскохозяйственных наук Т. И. Дьячук (ФГБНУ ФАНЦ Юго-Востока).

Зрелые зерновки тритикале и пшеницы промывали раствором детергента, выдерживали в 3%-м растворе перекиси водорода 10 минут и замачивали в воде на 24 часа. Зерновки с наклюнувшимся зародышем стерилизовали 3–6%-м коммерческим раствором гипохлорита натрия 10 минут, промывали тремя порциями стерильной дистиллированной воды, затем вычленяли зародыши в стерильных условиях ламинар-бокса. Для культивирования использовали питательную среду Мурасиге-Скуга без гормонов [12]. Через две недели пробирки с нормально развитыми проростками (с 3–5 корнями и 2-3 листьями) переносили в холодильную камеру (+4 ºС) для яровизации *in vitro*. Изучали 5 вариантов продолжительности яровизации – 20, 30, 40, 50, 60 суток. Далее растения высаживали в кубики из минеральной ваты в гидропонную систему капельного типа в ФТК. Для каждого из 5 вариантов яровизации было высажено по 10 растений (n = 10), что составило по 50 растений для каждого из 12 сортообразцов (всего 600 растений, N = 600). Высадка растений всех вариантов производилась одновременно в третьей декаде февраля, чтобы все растения находились в одинаковых условиях освещения. Кроме естественного фона освещения проводили дополнительное досвечивание в течение 22 часов в сутки LD-лампами (производитель «Агрономия XXI века», светодиодные чипы SMD5630, температура света 6000К «Нусакан», 250–1000 Вт, ФАР 1621,3 мкмоль×см$^{-1}$×м$^{-3}$, 104000 lux на уровне светильника, 40000 на уровне растений). Питательный раствор подавался капельно к каждому растению. Температура в вегетационном боксе поддерживалась в пределах 20–26 ºС. Анализировали следующие признаки: продолжительность фенологических фаз (сут); количество побегов на растении всего и продуктивных (шт.); высота побега (см); площадь флагового листа (см^2); длина колоса (см); вынос колоса (см); количество колосков в колосе (шт.); количество цветков в колоске (шт.); масса зерна с колоса и растения (г). Окончание генерации считали на 18-е сутки после цветения, когда колосья

могут быть срезаны, а незрелые зерновки использованы для введения зародышей в культуру *in vitro* и получения следующего поколения растений. При этом основную часть растений оставляли до полного созревания для оценки продуктивности растений (массы зерна с колоса и растения, г).

Экспериментальные данные анализировали в программе STATISTICA 10 (StatSoft, США). Влияние факторов (продолжительность яровизации и генотип сортообразцов) оценивали методом двухфакторного дисперсионного анализа. В качестве апостериорного теста использовали тест Тьюки ($P \leq 0,05$).

Результаты и их обсуждение. Проростки тритикале и пшеницы, полученные из зародышей в культуре *in vitro,* после яровизации были высажены в ФТК, успешно адаптировались и переходили к активной вегетации. Фазу кущения у тритикале фиксировали на 13–17 сутки во всех вариантах яровизации. У всех сортов пшеницы данная фаза наступила на 17–25 сутки, но только в вариантах при длительности яровизации 50 и 60 суток, у сорта Новоершовская – при 40 суток яровизации.

Период яровизации, после которого более чем у 50 % растений от общего количества высаженных наблюдалось формирование продуктивных побегов (наступало колошение, цветение и формирование семян), можно считать эффективным. Только у тритикале-двуручек переход к генеративной фазе роста отмечен даже в варианте с 20 сутками яровизации, у линии Л11 с частотой 20 %, у сорта Валентин 90 этот показатель достигал 60 % (рис. 1, *а*). У линий Л11 и Л14 эффективный период яровизации составил не менее 50 суток, у сорта Зубр – 60 суток. Продолжительность периода от наступления фазы кущения до цветения составил от 37 суток у сорта Валентин 90 (60 суток яровизации) до 59 суток у сорта Зубр (50 суток яровизации). Продолжительность генерации у двуручек составила от 118 суток у сорта Валентин 90 до 152 суток у линии Л11 и сорта Зубр.

Из четырех образцов озимой тритикале только для линии Л17 40 суток *in vitro*-яровизации были достаточным сроком для перехода к генеративной фазе (рис 1, *б*), но формирование продуктивных побегов в этом варианте отмечено только у 10 % растений. Остальным образцам для яровизации потребовалось не менее 50 суток, а для колошения более половины растений – не менее 60 суток яровизации. У сорта Георг даже после 60 суток яровизации колошение наблюдали только у 37,5 % растений.

Продолжительность межфазного периода «кущение – цветение» у тритикале Л17 увеличилась с 34 до 69 суток при сокращении яровизации на 10 суток (с 60 до 50 суток). У сорта Георг после 50 суток яровизации этот период занял 60 суток. В целом у сортообразцов тритикале озимой продолжительность генерации от введения в культуру зародышей до получения зародышей следующего поколения была гораздо больше, чем у двуручек, и составила 150–170 суток.

У сорта озимой пшеницы Новоершовская в варианте с 40 сутками яровизации наблюдали успешный переход к генеративному этапу развития 50 % растений (рис 1, *в*). Сортам Губернатор Дона и Московская 40 требовалось не менее 50 суток яровизации, а растения сорта Скипетр переходили к формированию продуктивных побегов только после 60 суток яровизации. Продолжительность межфазного периода «кущение – цветение» составила от 28 суток у сорта Губернатор Дона (60 суток яровизации) до 52 суток у сорта Московская 40 (50 суток яровизации). Общая продолжительность генерации у сортов озимой пшеницы составила 119–152 суток, то есть на уровне двуручек тритикале.

Общая и продуктивная кустистость также в значительной степени зависели от сроков яровизации (рис. 2). У всех сортов и линий общее количество побегов, формирующихся на растении, значительно снижалось при увеличении продолжительности яровизации и приобретении способности к формированию продуктивных побегов, в том числе достоверное снижение установлено по результатам дисперсионного анализа и теста Тьюки по фактору В (продолжительность яровизации). Также наблюдалось достоверное различие по сортам (фактор А). Максимально формировалось до 33 побегов на растениях пшеницы сорта Губернатор Дона.

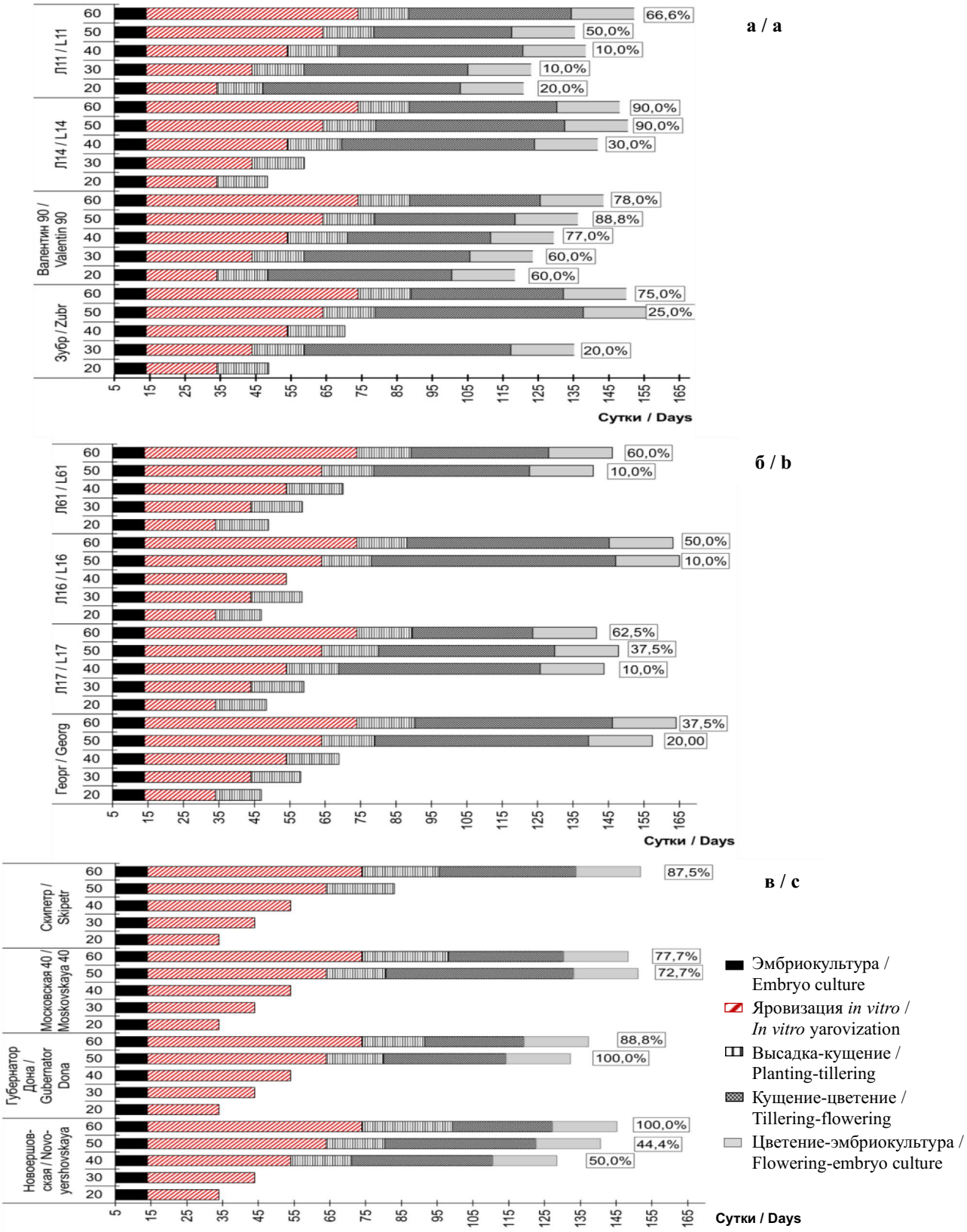


Рис. 1. **Продолжительность фаз вегетации сортов и линий тритикале двуручек (а), тритикале озимой (б) и пшеницы озимой (в) в зависимости от сроков яровизации *in vitro* (20, 30, 40, 50, 60 суток) и количество растений, достигших генеративной фазы роста, % /**

Fig. 1. **Duration of the vegetation phases of cultivars and lines of facultative triticale (a), winter triticale (b) and winter wheat (c) depending on the time of in vitro vernalization (20, 30, 40, 50, 60 days) and the number of plants that have reached the generative growth phase, %**

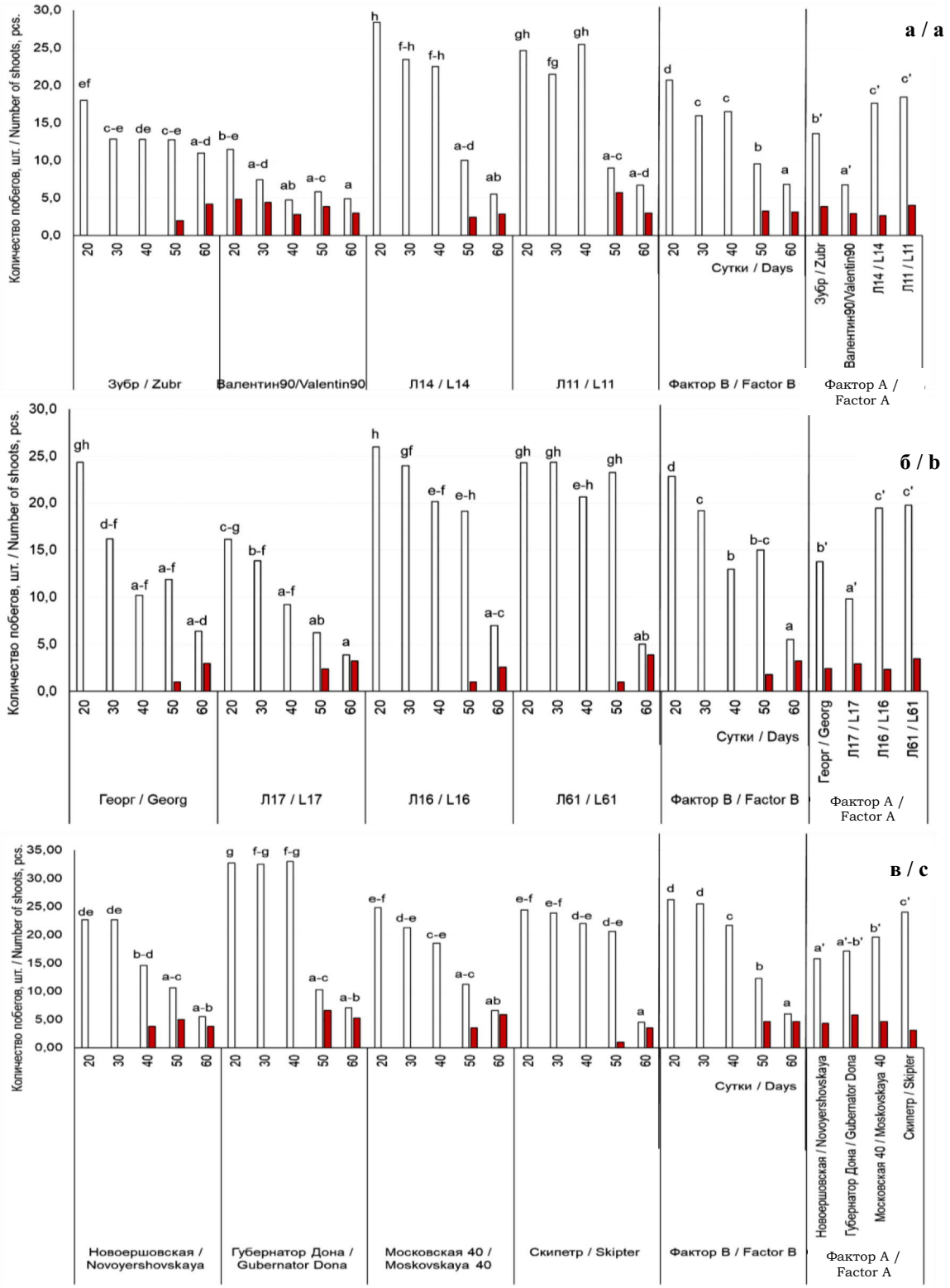


Рис. 2. **Общая и продуктивная кустистость у сортов и линий тритикале двуручек (а), тритикале озимой (б) и пшеницы озимой (в) в зависимости от сроков яровизации *in vitro* (20, 30, 40, 50, 60 суток), а также в среднем по генотипам (Фактор А) и по продолжительности яровизации (Фактор В). Разными буквами латинского алфавита (a, b, c и т. д.) отмечены значения, статистически значимо различающиеся при p<0,05 /**

Fig. 2. **Total and productive tillering of cultivars and lines of facultative triticale (a), winter triticale (b) and winter wheat (c) depending on the in vitro vernalization period (20, 30, 40, 50, 60 days), as well as on average by genotypes (Factor A) and by the duration of vernalization (Factor B). Different letters of the Latin alphabet (a, b, c etc.) mark the values that differ significantly at p<0.05**

У большинства сортообразцов продуктивные побеги формировались только в вариантах с 50 и 60 сутками яровизации, различия между вариантами по данному признаку были незначительные. Исключение составлял сорт тритикале двуручки Валентин 90 (рис. 2, *а*). В отличие от остальных сортообразцов, в том числе двуручек, у данного сорта продуктивные побеги образовывались во всех вариантах опыта, но общая закономерность снижения общей кустистости (в 2,3 раза) при увеличении продолжительности яровизации сохранялась

В вариантах, где яровизация прошла успешно, отношение количества продуктивных побегов к общему количеству побегов в зависимости от генотипа у двуручек составляло не более 1,0:1,5 (табл. 1), у озимой тритикале и озимой пшеницы – 1,0:1,2 (табл. 2, 3). У некоторых генотипов, например, у сорта тритикале Зубр и линии Л16, это соотношение составляло не менее 1:3, даже в вариантах с 60-суточной яровизацией.

Анализ морфологических признаков и элементов структуры продуктивности по вариантам опыта показал, что в большинстве случаев величины изучаемых признаков не зависели от продолжительности яровизации. По признакам: площадь флагового листа, вынос колоса, длина колоса, количество колосков в колосе, количество цветков в колоске данные не приводятся, так как достоверных различий между вариантами не установлено. По некоторым признакам были определены различия между вариантами яровизации у части генотипов (табл. 1, 2, 3). Озерненность колосьев в вариантах, где растения успешно прошли яровизацию, у тритикале составляла в среднем 45 зерен в колосе, у пшениц – 26 зерен, кроме сорта Скипетр, у которого завязывалось около 40 зерен в колосе.

У тритикале-двуручек установлено достоверное повышение массы зерна с колоса и растения. Так, у сорта Валентин 90 эти показатели увеличились соответственно на 52 и 48 % в варианте с 60 сутками яровизации по сравнению с вариантом с 20 сутками, а у линии Л14 масса зерна с растения при увеличении продолжительности яровизации возросла на 63,5 % (табл. 1).

У озимой тритикале линии Л61 в варианте с 60 сутками яровизации достоверно увеличилась высота растений (на 34 %) и масса зерна с растения (в 68 раз), у сорта Георг возросла масса зерна с растения в 6,3 раза, у линии Л17 отмечено снижение высоты растений в среднем на 15 % (табл. 2).

У озимых пшениц выделился сорт Новоершовская, у которого в варианте с 50 сутками яровизации достоверно увеличилась высота растений (на 18 % по сравнению с вариантом с 40 сутками яровизации), масса зерна с колоса (в 2,8 раза) и растения (в 7 раз) (табл. 3). Кроме того, наблюдали повышение массы зерна с растения (в 4,3 раза) у сорта Московская 40 с увеличением продолжительности яровизации (с 50 до 60 сут).

В проведенном исследовании продолжительность генерации в среднем составила около 150 суток. У двуручек этот период может быть сокращен еще на месяц, при этом понятие «двуручка» является не биологическим, а хозяйственным; особенности таких сортов и линий зависят от присутствия в генотипе аллелей генов ортологичной серии *Vrn-1* [13]. Все изученные сорта в естественных условиях выращивания характеризуются как среднеспелые, кроме сорта пшеницы Губернатор Дона, который в государственном реестре сортов указан как среднеранний. Общая продолжительность генерации этого сорта в условиях фитотронно-тепличного комплекса также была в среднем на 10 дней меньше, чем остальных сортов пшеницы.

Примененный метод эмбриокультуры *in vitro* не позволил снизить продолжительность яровизации менее, чем до 50 суток. Общая продолжительность генерации составила от 118 до 152 суток у изученных сортов и линий озимой пшеницы и тритикале-двуручек, от 150 до 170 суток – у озимой тритикале. Это не позволяет получать более 2 поколений за год с учетом того, что получаемые незрелые зародыши из зерновок на 14–16 сутки после опыления могут быть вычленены и помещены на искусственную питательную среду. Полученные проростки подвергнуты яровизации по предложенной схеме и затем высажены в ФТК для получения семян. Продолжительность выращивания двух поколений растений при таком способе составит 300–340 суток. Резерв для дальнейшего сокращения срока вегетации может заключаться в подборе условий для сокращения периода яровизации, а также выращивания в межфазный период «кущение – колошение», что успешно достигнуто на яровых злаках [2].

Таблица 1 – **Влияние яровизации *in vitro* на морфологические признаки и продуктивность растений тритикале-двуручек /**
Table 1 – **The effect of *in vitro* vernalization on the morphological characteristics and productivity of facultative triticale plants**

Сорт, линия / Cultivar, line	*Продолжительность яровизации, сут / Vernalization, days*	*Отношение количества продуктивных побегов к общему количеству побегов / The ratio of the number of productive shoots to the total number of shoots*	*Высота растений, см / Plant height, cm*	*Количество зерен в колосе, шт. / Number of grains in an ear, pcs.*	*Масса зерна, г / Grain weight, g*	
					с колоса / grain per ear	*с растения / grain per plant*
Зубр / ‘Zubr’	50	0,16	107,0 abc	35,3	0,8 a	1,5 a
	60	0,38	112,6 c	40,0	0,7 a	3,4 ab
Валентин 90 / ‘Valentin 90’	20	0,42	81,4 a	40,1	1,2 a	5,4 b
	30	0,59	87,6 ab	53,0	1,5 a	6,1 b
	40	0,60	82,5 a	50,5	2,0 ab	4,9 b
	50	0,66	90,6 ab	48,6	1,7 a	5,0 b
	60	0,61	84,8 a	62,3	2,6 b	8,0 c
Л11 / L11	50	0,64	94,5 ab	59,2	2,5 b	14,6 d
	60	0,45	86,7 ab	61,8	2,6 b	6,8 bc
Л14 / L14	50	0,24	99,4 bc	54,1	1,9 ab	5,2 b
	60	0,53	96,5 ab	59,0	2,5 b	8,5 c

Таблица 2 – **Влияние яровизации *in vitro* на морфологические признаки и продуктивность растений озимой тритикале /**
Table 2 – **The effect of *in vitro* vernalization on the morphological characteristics and productivity of winter triticale plants**

Сорт, линия / Cultivar, line	*Продолжительность яровизации, сут / Vernalization, days*	*Отношение количества продуктивных побегов к общему количеству побегов / The ratio of the number of productive shoots to the total number of shoots*	*Высота растений, см / Plant height, cm*	*Количество зерен в колосе, шт. / Number of grains in an ear, pcs.*	*Масса зерна, г / Grain weight, g*	
					с колоса / grain per ear	*с растения / grain per plant*
Георг / ‘Georg’	50	0,08	82,7 ab	32,0	0,9	1,0 ab
	60	0,47	78,4 a	33,0	0,9	6,3 c
Л16 / L16	50	0,05	86,5 ab	45,9	1,0	1,0 ab
	60	0,37	89,4 b	48,0	1,6	6,0 bc
Л17 / L17	50	0,38	93,8 b	40,4	1,7	6,2 c
	60	0,84	80,1 a	45,8	2,1	7,8 c
Л61 / L61	50	0,04	87,0 ab	54,4	0,1	0,1 a
	60	0,77	116,6 c	63,1	1,8	6,8 c

Примечание: разными буквами латинского алфавита (a, b, c и т. д.) отмечены значения, статистически значимо различающиеся при $p<0,05$.
Note: Different letters of the Latin alphabet (a, b, c, etc.) mark the values that differ significantly at $p<0.05$.

Таблица 3 – **Влияние яровизации *in vitro* на морфологические признаки и продуктивность растений озимой пшеницы /**
Table 3 – **The effect of *in vitro* vernalization on the morphological characteristics and productivity of winter wheat plants**

Сорт, линия / Cultivar, line	*Продолжительность яровизации, сут / Vernalization, days*	*Отношение количества продуктивных побегов к общему количеству побегов / The ratio of the number of productive shoots to the total number of shoots*	*Высота растений, см / Plant height, cm*	*Количество зерен в колосе, шт. / Number of grains in an ear, pcs.*	*Масса зерна, г / Grain weight, g*	
					с колоса / grain per ear	*с растения / grain per plant*
Новоершовская / ‘Novoyershovskaya’	40	0,26	76,0 b	22,4 a	0,5 a	1,2 a
	50	0,47	86,4 bc	27,2 ab	1,4 b	8,4 b
	60	0,69	73,8 b	23,8 a	1,3 ab	5,9 ab
Губернатор Дона / ‘Gubernator Dona’	50	0,64	54,2 a	25,0 a	0,9 a	4,8 ab
	60	0,74	54,1 a	29,1 ab	1,2 a	5,4 ab
Московская 40 / ‘Moskovskaya 40’	50	0,31	91,8 c	27,1 ab	0,6 a	1,7 a
	60	0,88	80,0 bc	26,4 ab	1,2 ab	7,3 b
Скипетр / ‘Skipter’	50	0,05	78,0 abc	40,0 b	1,3 ab	6,0 ab
	60	0,78	74,3 b	41,7 b	1,8 b	6,6 b

Примечание: разными буквами латинского алфавита (a, b, c и т. д.) отмечены значения, статистически значимо различающиеся при $p<0,05$.
Note: Different letters of the Latin alphabet (a, b, c, etc.) mark the values that differ significantly at $p<0.05$.

Высота растений в условиях гидропоники была несколько снижена по сравнению с описанием сортов, но общая характеристика сохранялась. Среди сортов тритикале-двуручек к высокорослым относится Зубр (128 см), сорт Валентин 90 – средней высоты (98 см) [14]. Это соотношение сохранилось и в условиях ФТК (табл. 1). Среди пшениц сорта Московская 40 и Скипетр характеризуются короткой и средней длиной соломины, Новоершовская и Губернатор Дона как среднерослые. В условиях фитотронно-тепличного выращивания сниженной высотой растений выделился сорт Губернатор Дона (табл. 3), что может быть сортовой особенностью реакции на искусственные условия.

Формирование зерна в условиях опыта проходило успешно, что позволяет получать достаточно материала для следующих этапов селекционного процесса (табл. 1, 2, 3). Выявленные различия в продуктивности растений тем не менее не позволяют говорить о возможности проведения отбора в искусственных условиях, так как селекция на продуктивность должна проводиться в естественных условиях и сочетаться с адаптивностью к стрессовым факторам [15].

Заключение. Таким образом, проведенные исследования показали, что метод яровизации *in vitro* растений, полученных из зрелых зародышей, может успешно применяться для сокращения продолжительности генерации озимой тритикале и пшеницы. Однако эффективная продолжительность периода яровизации в изученных условиях составляет для истинных озимых форм не менее 50 суток. Для сортов тритикале-двуручек может быть достаточно 20 суток. В условиях ФТК при выращивании растений в малообъемной капельной гидропонной установке формируются полноценные растения пшеницы и тритикале, у которых продуктивность составила более 30 зерен с колоса, что достаточно для получения необходимого количества семян в ранних звеньях селекционного процесса. Дальнейшая работа по сокращению продолжительности генерации может вестись по двум направлениям: дальнейший подбор условий для сокращения времени яровизации и уменьшение межфазного периода «кущение – колошение».

Список литературы

1. Watson A., Ghosh S., Williams M. J., Cuddy W. S., Simmonds J., Rey M. D. et al. Speed breeding is a powerful tool to accelerate crop research and breeding. Nature plants. 2018;4(1):23–29. DOI: https://doi.org/10.1038/s41477-017-0083-8

2. Schoen A., Wallace S., Holbert M. F., Brown-Guidera G., Harrison S., Murphy P. et al. Reducing the generation time in winter wheat varieties using speed breeding. Crop Science. 2023;63(4):2079–2090. DOI: https://doi.org/10.1002/csc2.20989

3. Lee G. H., Kim T. K., Choi C. H., Kim J. Y. Evaluation of tissue culture efficiency in a speed breeding system for stable and sustainable supported wheat (*Triticum aestivum*) immature embryogenesis. The Korean Journal of Crop Science. 2020;65(4):365–376. DOI: https://doi.org/10.7740/kjcs.2020.65.4.365

4. Jähne F., Hahn V., Würschum T., Leiser W. L. Speed breeding short-day crops by LED-controlled light schemes. Theoretical and Applied Genetics. 2020;133(8):2335–2342. DOI: https://doi.org/10.1007/s00122-020-03601-4

5. Chai Y., Zhao Z., Lu S., Chen L., Hu Y. Field evaluation of wheat varieties using canopy temperature depression in three different climatic growing seasons. Plants (Basel). 2022;11(24):3471. DOI: https://doi.org/10.3390/plants11243471

6. Захарова Н. Н., Захаров Н. Г. Сортовая дифференциация озимой мягкой пшеницы по группам спелости в лесостепи Среднего Поволжья. Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2020;(2(50)):91–97. DOI: https://doi.org/10.18286/1816-4501-2020-2-91-97 EDN: ERKOEN

7. Мединский А. В., Стёпочкин П. И. Яровизация озимых сортов тритикале. Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2013;(4):27–30. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21226327 EDN: RWMWXX

8. Ержебаева Р. С., Абдурахманова М. А., Бастаубаева Ш. О., Таджибаев Д. Эмбриогенез и регенерация растений в культуре пыльников гексаплоидной тритикале (× *Triticosecale* Wittmack) под влиянием цитокинина зеатина. Сельскохозяйственная биология. 2019;54(5):934–945.
DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2019.5.934rus EDN: RZQJMC

9. Мусинов К. К., Козлов В. Е., Сурначёв А. С., Лихенко И. Е. Потребность в продолжительности яровизации коллекционных образцов мягкой озимой пшеницы. Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2021;51(6):31–38. DOI: https://doi.org/10.26898/0370-8799-2021-6-4 EDN: KYULQN

10. Булавка Н. В. Яровизационная потребность сортов озимой мягкой пшеницы в связи с их морозоустойчивостью. Земледелие и селекция в Беларуси. 2014;(50):383–392. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30029797 EDN: ZHDRTX

11. Акинина В. Н., Дьячук Т. И., Жилин С. В., Калашникова Э. В. Методы культуры ткани *in vitro* для создания исходного материала для селекции тритикале в Поволжье. Зерновое хозяйство России. 2020;(1):64–68.
DOI: https://doi.org/10.31367/2079-8725-2020-67-1-64-68 EDN: VUFZEV

12. Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. Physiologia Plantarum. 1962;15(3):473–497. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x

13. Файт В. И., Губич Е. Ю., Зеленина Г. А. Различия сортов двуручек мягкой пшеницы по генам Vrn-1 типа развития. Plant Varieties Studying and Protection. 2018;14(2):160–169.
DOI: https://doi.org/10.21498/2518-1017.14.2.2018.134762 EDN: XSUURN

14. Дьячук Т. И., Акинина В. Н., Жилин С. В., Хомякова О. В., Барнашова Е. К., Калашникова Э. В., Куликова В. П. Новый сорт озимой тритикале Зубр. Аграрный научный журнал. 2022;(6):19–22.
DOI: https://doi.org/10.28983/asj.y2022i6pp19-22 EDN: WAAWZV

15. Cha J. K., Park H., Choi C., Kwon Y., Lee S. M., Oh K. W. et al. Acceleration of wheat breeding: enhancing efficiency and practical application of the speed breeding system. Plant Methods. 2023;19:118.
DOI: https://doi.org/10.1186/s13007-023-01083-1

References

1. Watson A., Ghosh S., Williams M. J., Cuddy W. S., Simmonds J., Rey M. D. et al. Speed breeding is a powerful tool to accelerate crop research and breeding. Nature plants. 2018;4(1):23–29. DOI: https://doi.org/10.1038/s41477-017-0083-8

2. Schoen A., Wallace S., Holbert M. F., Brown-Guidera G., Harrison S., Murphy P. et al. Reducing the generation time in winter wheat varieties using speed breeding. Crop Science. 2023;63(4):2079–2090. DOI: https://doi.org/10.1002/csc2.20989

3. Lee G. H., Kim T. K., Choi C. H., Kim J. Y. Evaluation of tissue culture efficiency in a speed breeding system for stable and sustainable supported wheat (*Triticum aestivum*) immature embryogenesis. The Korean Journal of Crop Science. 2020;65(4):365–376. DOI: https://doi.org/10.7740/kjcs.2020.65.4.365

4. Jähne F., Hahn V., Würschum T., Leiser W. L. Speed breeding short-day crops by LED-controlled light schemes. Theoretical and Applied Genetics. 2020;133(8):2335–2342. DOI: https://doi.org/10.1007/s00122-020-03601-4

5. Chai Y., Zhao Z., Lu S., Chen L., Hu Y. Field evaluation of wheat varieties using canopy temperature depression in three different climatic growing seasons. Plants (Basel). 2022;11(24):3471. DOI: https://doi.org/10.3390/plants11243471

6. Zakharova N. N., Zakharov N. G. Varietal differentiation of winter soft wheat by maturity groups in the forest-steppe of the Middle Volga region. *Vestnik Ulyanovskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2020;(2(50)):91–97. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.18286/1816-4501-2020-2-91-97

7. Medinsky A. V., Stepochkin P. I. Winter triticale varieties vernilization. *Vestnik NGAU (Novosibirsky gosudarstvenny agrarny universitet)* = Bulletin of NSAU (Novosibirsk State Agrarian University). 2013;(4):27–30. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21226327

8. Yerzhebayeva R. S., Abdurakhmanova M. A., Bastaubayeva Sh. O., Tadjibayev D. Effect of zeatin on in vitro embryogenesis and plant regeneration from anther culture of hexaploid triticale (× *Triticosecale* Wittmack). *Selskokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2019;54(5):934–945. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2019.5.934rus

9. Musinov K.K., Kozlov V.E., Surnachev A.S., Likhenko I.E. The need for the vernalization duration of soft winter wheat collection samples. *Sibirsky vestnik selskokhozyaystvennoy nauki* = Siberian Herald of Agricultural Science. 2021;51(6):31–38. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.26898/0370-8799-2021-6-4

10. Bulavka N. V. Vernalization requirement of winter soft wheat varieties in relation to their winter hardiness. *Zemledeliye i selektsiya v Belarusi* = Arable Farming and Plant Breeding in Belarus. 2014;(50):383–392. (In Belarus). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30029797

11. Akinina V.N., Diyachuk T.I., Zhilin S.V., Kalashnikova E.V. *In vitro* fabric culture methods to develop the initial material for triticale breeding in the Volga region. *Zernovoye khozyaystvo Rossii* = Grain Economy of Russia. 2020;(1):64–68. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.31367/2079-8725-2020-67-1-64-68

12. Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. Physiologia Plantarum. 1962;15(3):473–497. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x

13. Fait V. I., Gubich O. Yu., Zelenina G. A. Differences in the alternate varieties of soft wheat for Vrn-1 genes of development type. Plant Varieties Studying and Protection. 2018;14(2):160–169. (In Ukraina). DOI: https://doi.org/10.21498/2518-1017.14.2.2018.134762

14. Dyachuk T. I., Akinina V. N., Zhilin S. V., Khomyakova O. V., Barnashova E. K., Kalashnikova E. V., Kulikova V. P. New variety of winter triticale Zubr. *Agrarny nauchny zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2022;(6):19–22. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.28983/asj.y2022i6pp19-22

15. Cha J. K., Park H., Choi C., Kwon Y., Lee S. M., Oh K. W. et al. Acceleration of wheat breeding: enhancing efficiency and practical application of the speed breeding system. Plant Methods. 2023;19:118. DOI: https://doi.org/10.1186/s13007-023-01083-1

Вклад авторов: Ткаченко О. В. – концепция и план исследования, анализ данных, подготовка рукописи; Рязанцев Н. В., Костина Е. Е. – концепция и план исследования, подготовка рукописи; Беляева А. А. – анализ данных, подготовка рукописи.

Сведения об авторах

✉ **Ткаченко Оксана Викторовна**, кандидат с.-х. наук, доцент, заведующая кафедрой «Растениеводство, селекция и генетика», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова», просп. им. Петра Столыпина зд. 4, стр. 3, г. Саратов, Российская Федерация, 410012, e-mail: rector@vavilovsar.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8327-6763,** e-mail: oktkachenko@yandex.ru

Рязанцев Никита Валерьевич, кандидат с.-х. наук, директор Института генетики и агрономии, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова», просп. им. Петра Столыпина зд. 4, стр. 3, г. Саратов, Российская Федерация, 410012, e-mail: rector@vavilovsar.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5808-9827**

Беляева Анна Анатольевна, кандидат с.-х. наук, доцент, доцент кафедры «Растениеводство, селекция и генетика», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова», просп. им. Петра Столыпина зд. 4, стр. 3, г. Саратов, Российская Федерация, 410012, e-mail: rector@vavilovsar.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3847-4874**

Костина Екатерина Евгеньевна, заведующая лабораторией кафедры «Растениеводство, селекция и генетика», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова», просп. им. Петра Столыпина зд. 4, стр. 3, г. Саратов, Российская Федерация, 410012, e-mail: rector@vavilovsar.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7448-9987**

Author contributions: Tkachenko O. V. – research concept and plan, data analysis, manuscript preparation; Ryazantsev N. V., Kostina E. E. – research concept and plan, manuscript preparation; Belyaeva A. A. – data analysis, manuscript preparation.

Information about the authors

✉ **Oksana V. Tkachenko**, PhD in Agricultural Science, associate professor, Head of the Department of Crop Production, Breeding and Genetics, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, Peter Stolypin Ave., 4/3, Saratov, Russian Federation, 410012, e-mail: rector@vavilovsar.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8327-6763**, e-mail: oktkachenko@yandex.ru

Nikita V. Ryazantsev, PhD in Agricultural Science, Director, the Institute of Genetics and Agronomy, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, Peter Stolypin Ave., 4/3, Saratov, Russian Federation, 410012, e-mail: rector@vavilovsar.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5808-9827**

Anna A. Belyaeva, PhD in Agricultural Science, associate professor, associate professor at the Department of Crop Production, Breeding and Genetics, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, Peter Stolypin Ave., 4/3, Saratov, Russia Federation, 410012, e-mail: e-mail: rector@vavilovsar.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3847-4874**

Ekaterina E. Kostina, Head of the Laboratory, the Department of Plant Breeding, Breeding and Genetics, Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N. I. Vavilov, Peter Stolypin Ave., 4/3, Saratov, Russian Federation, 410012, e-mail: rector@vavilovsar.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7448-9987**

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.319–330
УДК 633.16

(cc) BY

Результаты генотипической и фенотипической оценки сортов ячменя по устойчивости к алюминию

© 2026. А. В. Бакулина✉, Е. А. Бессолицына, О. Н. Шуплецова, Л. С. Савинцева
ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», г. Киров, Российская Федерация

В данной работе сопоставляли результаты молекулярно-генетического анализа с использованием ПЦР-маркеров (HVM68, 1kb-insertion, HvMATE-21indel) десяти генотипов Hordeum vulgare* L. *с фенотипической оценкой их алюмоустойчивости. Объектом исследования служили сорта ячменя Новичок, Дина, Форвард, Бионик, Витрум, Родник Прикамья, Памяти Дудина (Россия), Зазерский 85 (Беларусь), Triumph (Дания), Tallon (Австралия). Установлено, что изучаемые генотипы ячменя не имели мутации 1kb-insertion (ПЦР-продукт 1841 п. н.), усиливающей экспрессию гена HvAACT1 (у всех сортов получены ПЦР-продукты размером 818 п. н.). Делеция HvMATE-21indel (ПЦР-продукт 475 п. н.) была обнаружена в геноме трех сортов – алюмоустойчивых Новичок, Бионик и кистотоустойчивого Родник Прикамья. При использовании микросателлитного маркера HVM68 у сортов ячменя были выявлены ампликоны в диапазоне 175–220 п. н. Сделано предположение, что исследованные генотипы ячменя имеют разные механизмы регуляции гена HvAACT1 и/или характеризуются его полиморфизмом, что требует дальнейшего изучения. Среди использованных в работе ПЦР-маркеров алюмоустойчивости ячменя наиболее перспективным является маркер HvMATE-21indel. На основании морфологической оценки проростков по показателю «индекс длины корней» бóльшая часть сортов (90 %) была отнесена к умеренно устойчивым (Форвард, Новичок, Витрум, Зазерский 85, Tallon) и устойчивым (Дина, Бионик, Родник Прикамья, Triumph) генотипам. При этом ген-специфичный маркер HvMATE-21indel выявили только у трёх сортов, что свидетельствует о необходимости расширения набора ДНК-маркеров, применяемых для идентификации мутаций гена HvAACT1 и его регуляторных областей. Использованный подход цитологической оценки алюмоустойчивости перспективен для определения реакции генотипа на моделируемый алюмокислый стресс, но требует дальнейшей оптимизации. Для характеристики алюмоустойчивости ячменя по фенотипу целесообразно использовать комплексный подход, включающий как полевые, так и лабораторные оценки.

Ключевые слова: *Hordeum vulgare* L.*, алюмоустойчивость, ген HvAACT1, ПЦР-маркеры, ИДК, цитологическая оценка*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (темы №№ FNWE-2025-0001, FNWE-2025-0008).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в оценку данной статьи.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Бакулина А. В., Бессолицына Е. А., Шуплецова О. Н., Савинцева Л. С. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):319–330. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.319-330

Поступила в редакцию: 24.10.2025 Принята к публикации: 16.03.2026
Доработана после рецензирования: 23.01.2026 Опубликована онлайн: 27.04.2026

Results of genotypic and phenotypic evaluation of barley cultivars for aluminum tolerance

© 2026. Anna V. Bakulina✉, Ekaterina A. Bessolitsyna, Olga N. Shupletsova, Larisa S. Savintseva
Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Kirov, Russian Federation

This study compared the results of molecular genetic analysis using PCR markers (HVM68, 1kb-insertion, HvMATE-21indel) of ten barley (Hordeum vulgare* L.*) genotypes with a phenotypic evaluation of their aluminum tolerance. The objects of the study were barley cultivars 'Novichok', 'Dina', 'Forvard', 'Bionik', 'Vitrum', 'Rodnik Prikamiya', 'Pamyati Dudina' (Russia), 'Zazerskij 85' (Belarus), 'Triumph' (Denmark), 'Tallon' (Australia). It was established that the studied barley genotypes did not have the 1kb-insertion mutation (PCR product 1841 bp), which enhanced the expression of the HvAACT1 gene (PCR products with a size of 818 bp were obtained in all cultivars). The HvMATE-21indel deletion (PCR product 475 bp) was detected in the genome of three cultivars – aluminum-tolerant 'Novichok', 'Bionik' and acid-tolerant 'Rodnik Prikamiya'. When using the HVM68 microsatellite marker, amplicons in the range of 175–220 bp were detected in barley cultivars. It is assumed that the studied barley genotypes have different mechanisms of regulation of the HvAACT1 gene and/or are characterized by its polymorphism, which requires further study. Among the PCR markers of barley aluminum tolerance used in the work, the most promising is the HvMATE-21indel marker. Based on the morphological evaluation of seedlings according to root length index (RLI), most of the cultivars (90 %) were classified as moderately tolerant ('Forvard, 'Novichok, 'Vitrum, 'Zazerskij 85', 'Tallon') and tolerant ('Dina', 'Bionik', 'Rodnik Prikamiya', 'Triumph') genotypes. At the same time the HvMATE-21indel gene-specific marker was detected in only three cultivars, which indicated the need to expand the set of DNA markers used to identify mutations in the HvAACT1 gene and its regulatory regions. The method used for cytological evaluation of aluminum tolerance

is promising for determining the genotype response to modeled aluminum-acid stress but requires further optimization. To characterize the aluminum tolerance of barley by phenotype it is advisable to use an integrated approach, including both field and laboratory analyses.

Keywords: *Hordeum vulgare* L.*, tolerance to aluminum toxicity, HvAACT1 gene, PCR markers, RTI, cytological evaluation*

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian within the state assignment of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (theme No. FNWE-2025-0001, FNWE-2025-0008).

The authors thank the reviewers for their contribution to the expert evaluation of this work.

Conflict of interests: the authors stated that there was no conflict of interests.

For citations: Bakulina A. V., Bessolitsyna E. A., Shupletsova O. N., Savintseva L. S. Results of genotypic and phenotypic evaluation of barley cultivars for aluminum tolerance. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):319–330. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.319-330

Received: 24.10.2025 Accepted for publication: 16.03.2026
Revised: 23.01.2026 Published online: 27.04.2026

Ячмень (*Hordeum vulgare* L.) – культура, хорошо адаптированная к различным неблагоприятным условиям окружающей среды в сравнении с другими злаками, однако наиболее чувствительная к токсичности ионов алюминия (Al^{3+}) в кислых почвах [1, 2]. Негативное воздействие алюминия сильнее проявляется на ранних стадиях развития растений и при недостатке питательных веществ [3]. Известно, что ионы Al^{3+} обладают высокой реакционной способностью, а для их связывания в растительных клетках имеется много потенциальных мишеней. Ионы Al^{3+} взаимодействуют с клеточной стенкой, клеточной мембраной и компонентами симпласта, вследствие чего оказывают влияние на широкий спектр протекающих в клетке процессов [4, 5]. Более того, доказано, что ионы Al^{3+}, попадая в ядро, вызывают повреждение ДНК [6]. Таким образом, изменения на клеточном уровне, вызванные токсичностью алюминия, приводят к ингибированию деления и удлинения клеток корня, снижению поглощения воды и питательных веществ, а в конечном итоге – к потере урожая зерна [7].

Способность ячменя противостоять вредному воздействию токсичных ионов алюминия – это сложный биологический процесс, который обусловлен генетическими характеристиками растения [8]. Основным геном, связанным с устойчивостью ячменя к алюминию, является *HvAACT1*, локализованный на хромосоме 4H и кодирующий белок-транспортер цитрата. Механизм устойчивости основан на нейтрализации цитратом ионов Al^{3+} путем их связывания клетками кончика корня в малоподвижные хелатные комплексы, что препятствует или замедляет попадание токсичных ионов внутрь растения [9]. Установлено, что уровень экспрессии гена *HvAACT1* конститутивно выше у устойчивых к алюминию генотипов, чем у чувствительных [10].

Полезным инструментом для выявления в геноме ячменя генов/локусов алюмоустойчивости и их мутаций, влияющих на проявление признака, являются молекулярные маркеры. Одними из первых в селекции на алюмоустойчивость ячменя были использованы микросателлитные маркеры (SSR-маркеры). Среди известных SSR-маркеров ячменя Bmag353, Bmac310 и HVM68 наиболее тесно сцеплены с локусом алюмоустойчивости *Alp* и характеризуются высоким уровнем полиморфизма [11, 12].

Разработаны также маркеры для выявления различных мутаций гена *HvAACT1 (HvMATE)*, который по расположению совпадает с *Alp* [10, 13]. У устойчивых к Al азиатских генотипов ячменя обнаружена вставка размером 1023 п. н. (1kb-insertion) в 5′-нетранслируемой области (5'-UTR) *HvAACT1*, которая функционирует как промотор и значительно усиливает экспрессию гена в клетках кончика корня [14]. Для европейских сортов ячменя сообщается о выявлении вставки мультиретротранспозон-подобной последовательности (MRL) размером не менее 15,3 тыс. п. н., которая также проявляет промоторную активность и значительно повышает экспрессию *HvAACT1* в кончиках корней Al-толерантных образцов [15]. Разработан маркер (HvMATE-21indel) для выявления делеции 21 п. н. в 3′-нетранслируемой области (3'-UTR) гена *HvAACT1*. Данный полиморфизм подтвержден у сортов, которые используются в качестве источника устойчивости к кислым почвам в программах селекции ячменя в Австралии, а эффективность маркера HvMATE-21indel превысила таковую у маркеров Bmag353, Bmac310 [1]. Позже был разработан ген-специфичный маркер Cit7, который позволяет выявлять однонуклеотидный полиморфизм (SNP), обусловливающий аминокислотную замену в гене *HvAACT1* у устойчивого к токсичным ионам алюминия сорта Br2 в сравнении с чувствительным Hamelin [16].

Таким образом, наличие разработанных к настоящему времени микросателлитных и ген-специфичных ПЦР-маркеров алюмоустойчивости ячменя делает актуальным их применение для выявления генотипов с потенциальной стрессоустойчивостью и дальнейшее внедрение в селекционный процесс отечественных генотипов. Однако, прежде чем ДНК-маркеры будут использованы в практических целях, необходимо протестировать их связь с фенотипом на широком наборе сортов, т. е. валидировать [17]. Поэтому при апробации маркеров на новых сортах также важно иметь предварительную характеристику фенотипа.

Цель исследований – молекулярно-генетический анализ с использованием ПЦР-маркеров (HVM68, 1kb-insertion, HvMATE-21indel) десяти сортов ячменя и характеристика их алюмоустойчивости с помощью морфологической (по индексу длины корней) и цитологической оценок.

Научная новизна – получены новые экспериментальные данные о генетическом контроле алюмоустойчивости сортов ячменя, включая сорта отечественной селекции; проведена апробация методики цитологической оценки, которая показала свою перспективность в определении устойчивости ячменя к моделируемому в лабораторных условиях алюмокислому стрессу.

Материал и методы. Объектом исследования служили десять сортов ярового ячменя *H. vulgare* L., предоставленные лабораторией селекции и первичного семеноводства ячменя ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока: отечественной селекции (Новичок, Дина, Форвард, Бионик, Витрум, Родник Прикамья, Памяти Дудина) и высокоурожайные сорта зарубежной – Зазерский 85 (Беларусь), Triumph (Дания), Tallon (Австралия). Согласно результатам селекционной оценки, данным в работах [18, 19, 20], шесть российских сортов были отнесены к кислотоустойчивым, а три зарубежных – к чувствительным. Сорт Новичок, созданный на кислых почвах, и сорта-регенеранты (Форвард, Бионик, Витрум), индуцированные на кислых селективных средах *in vitro* с токсичностью алюминия, характеризовались алюмоустойчивостью. Сорт Памяти Дудина является ценным по урожайности и содержанию белка в зерне [21].

Для проведения молекулярно-генетического анализа суммарную ДНК выделяли из листьев ячменя, полученных от 5-дневных проростков, гуанидин-изотиоционатным методом[1]. Для постановки ПЦР использовали праймеры для детекции вставки 1023 п. н. (1kb-insertion) в 5'-UTR *HvAACT1*, делеции 21 п. н. (HvMATE-21indel) в 3'-UTR *HvAACT1* и SSR-маркер HVM68. Праймеры синтезированы в НПК «Синтол» (Россия), их последовательности приведены в таблице 1.

Таблица 1 – **Праймеры для ПЦР-анализа ячменя** /
Table 1 – **Primers for PCR analysis of barley**

Мишень / Target	*Последовательность праймера 5'-3' / Primer sequence 5'-3'*	*Ссылка / Reference*	*Ампликон, п. н./ Amplicon, b. p.*
1kb-insertion	F: GGTCCAACACTCTACCCTTCCTT	[14]	818 или 1841
	R: GCGAGTTGCCCCAGCTATTACAGA*		
HvMATE-21indel	F: GCTAGGGCTTGAAAACTGTTTG	[1]	475 или 496
	R: ACGAACTGTACGATGATGATGC**		
HVM68	F: AGGACCGGATGTTCATAACG	[22]	204
	R: CAAATCTTCCAGCGAGGCT		

Примечания: в последовательности праймеров 1kb-insertion R и HvMATE-21indel R нами введены модификации ввиду их несовпадений с последовательностями гена *HvAACT1*, имеющимися в базе данных Genbank; * последовательность праймера в оригинале **GGT**GCGAGTTGCCCC**T**AGCTATTACAGA [13]; ** последовательность праймера в оригинале **G**ACGAACTGTACGATGATGATGC [1] (несовпадения выделены полужирным шрифтом, эти нуклеотиды исключены) /

Notes: there were introduced modifications in the sequences of primers 1kb-insertion R and HvMATE-21indel R due to their mismatches with the sequences of the *HvAACT1* gene available in the Genbank database; * the primer sequence in the original **GGT**GCGAGTTGCCCC**T**AGCTATTACAGA [13]; ** the primer sequence in the original **G**ACGAACTGTACGATGATGATGC [1] (mismatches are highlighted in bold, these nucleotides are excluded)

[1]Sambrook J., Fritch T., Maniatis T. Molecular cloning: a laboratory manual. New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1983. 545 p. URL: https://archive.org/details/molecularclonning0000samb/page/n3/mode/2up

ПЦР проводили на программируемом термостате ТП4-ПЦР-01 «Терцик» («НПО ДНК-Технология», Россия). Реакционная смесь (10 мкл) содержала 10 нг ДНК, 200 мкМ dNTPs, 10 рМ каждого праймера, 1,5 мМ $MgCl_2$, 1 х PCR буфер, 3,75 ед. Taq-полимеразы («СибЭнзайм», Россия). Режим ПЦР: 1 цикл (95 ºС – 5 мин.); 35 циклов (95 ºС – 30 сек; 55, 62 и 72 ºС для праймеров HVM68 F/R, HvMATE-21indel F/R и 1kb-insertion F/R соответственно – 30 сек, 72 ºС – 1 мин 30 сек); 1 цикл (72 ºС – 8 мин (2 мин для пары 1kb-insertion F/R)).

Продукты амплификации разделяли электрофорезом в 1,5%-м агарозном геле; для разделения ПЦР-продуктов, полученных с праймерами HVM68 F/R, использовали 7%-й полиакриламидный гель (ПААГ). Гели окрашивали бромистым этидием[2]. Для определения длины полученных ампликонов использовали ДНК-маркеры молекулярного веса («СибЭнзайм», Россия). Визуализацию результатов электрофореза проводили с помощью трансиллюминатора «Квант-312» (Helicon, Россия). Регистрация результатов электрофореза выполнена с применением видеосистемы «Взгляд» и ПО IC Measure. Измерение длины полученных ампликонов проводили с помощью программы GelAnalyzer 23.1.1.

Фенотипическое проявление алюмоустойчивости исследуемых сортов ячменя оценивали по показателю «индекс длины корней» (ИДК) [23]. Семена проращивали в рулонной культуре в условиях алюмокислого стресса (40 мг/л ионов Al^{3+}, pH = 4,0) и контрольных (дистиллированная вода, pH = 6,0). Повторность опыта трёхкратная. Рулоны выдерживали в термостате при 21–23 °С. Длину корней измеряли через 5 суток. Рассчитывали ИДК (соотношение средней длины корней – контроль/опыт). Согласно [23], по реакции на алюминий генотипы разделяли на устойчивые (ИДК > 65 %), умеренно устойчивые (ИДК 50–65 %), умеренно чувствительные (ИДК 40–49 %) и чувствительные (ИДК < 40 %).

Проростки, полученные в контроле и условиях моделируемого Al^{3+} стресса, использовали для цитологической оценки алюмоустойчивости [24]. Для анализа отбирали пять проростков, не имеющих механических и инфекционных повреждений. Лезвием отрезали часть корня с чехликом и помещали в 1%-й раствор люголя на 10 мин. Окрашенные корневые чехлики просматривали в световом микроскопе Микромед-3 с видеоокуляром ToupCam UCMOS05100KPA, фотографировали. Повторность для каждого образца – трёхкратная.

Статистический анализ полученных данных проводили согласно[3] с использованием пакета программ Microsoft Excel 2010. Для показателя «длина корней» вычисляли среднее значение и стандартное отклонение. Для оценки влияния токсичности ионов алюминия на наличие в корневом чехлике выраженной зоны клеток с окрашенными крахмальными зёрнами рассчитывали непараметрический φ-критерий углового преобразования Фишера (2 × арксинус $\sqrt{X}$)[4]. Расчет φ-критерия проводили с помощью online-калькулятора на сайте (https://www.psychol-ok.ru/statistics/fisher/). Для всех статистических операций принят уровень значимости $p \leq 0{,}01$.

Результаты и их обсуждение. В результате ПЦР-анализа с использованием маркера HVM68, локализованного на хромосоме 4H и тесно связанного с локусом *Alp* [12], у исследуемых генотипов ячменя были выявлены ампликоны в диапазоне от 175 до 220 п. н. (рис. 1).

Алюмоустойчивые сорта ячменя имели различные по размеру ампликоны: Витрум (178 п. н.), Новичок (210 п. н.) и Бионик (212 п. н.), Форвард (два ампликона размером 193 и 205 п. н.). Кислотоустойчивые сорта Родник Прикамья и Дина имели ампликоны 207 и 209 п. н. соответственно, оба также характеризовались наличием дополнительного ампликона меньшего размера (175 п. н.). Среди высокоурожайных сортов ячменя различные аллели маркера HVM68 имели сорта Зазерский 85 (208 п. н.) и Tallon (216 п. н.), близкие по размеру ампликоны выявлены у сортов Памяти Дудина и Triumph (рис. 1).

Наши данные о высоком уровне полиморфизма в локусе HVM68 согласуются с результатами исследований зарубежных авторов. Размер ПЦР-продуктов, полученных при амплификации с праймерами HVM68 F/R, при изучении генетической вариабельности сортов ячменя из Кореи, Китая и Японии изменялся от 180 до 222 п. н. Наиболее часто выявляемый аллель (частота встречаемости 75–83 %) был представлен ампликоном 180 п. н. [25].

[2]Sambrook J., Fritch T., Maniatis T. Указ. соч.

[3]Лакин Г. Ф. Биометрия. М.: «Высшая школа», 1990. 323 с.

[4]Урбах В. Ю. Статистический анализ в биологических и медицинских исследованиях. М.: Изд-во МГУ, 1975. 275 с.

В работе [22] для маркера HVM68 указан размер ампликона 204 п. н., однако в этом исследовании проводилось картирование различных SSR-маркеров и нет данных об алюмоустойчивости изученных генотипов. Среди сортов, характеризующихся алюмоустойчивостью, идентифицированы аллели маркера HVM68 у сортов Dayton (197 п. н.) и WB223 (209 п. н.), но они не были уникальными среди других генотипов, используемых в селекции ячменя в Австралии [12]. Таким образом, маркер HVM68, являясь полиморфным, позволяет выявлять различные аллели данного локуса и оценивать генетическое разнообразие исследуемых сортов, но для установления связи с алюмоустойчивостью ячменя его применение при наличии ген-специфичных маркеров, на наш взгляд, нецелесообразно.

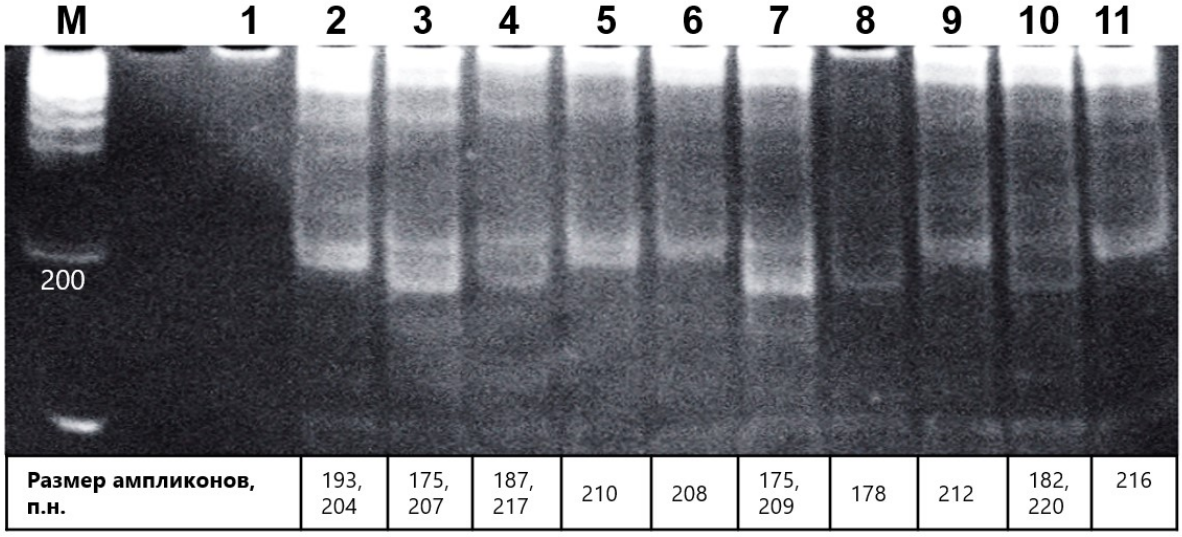


Рис. 1. **Электрофореграмма продуктов ПЦР, полученных при использовании праймеров HVM68 F/R. Номера дорожек соответствуют образцам: 1 – отрицательный контроль; 2 – Форвард; 3 – Родник Прикамья; 4 – Памяти Дудина; 5 – Новичок; 6 – Зазерский 85; 7 – Дина; 8 – Витрум; 9 – Бионик; 10 – Triumph; 11 – Tallon; M – маркер молекулярной массы /**

Fig. 1. **Electrophorogram of PCR products obtained using HVM68 F/R primers. The track numbers correspond to the samples: 1 – negative control; 2 – 'Forvard'; 3 – 'Rodnik Prikamiya'; 4 – 'Pamyati Dudina'; 5 – 'Novichok'; 6 – 'Zazerskij 85'; 7 – 'Dina'; 8 – 'Vitrum'; 9 – 'Bionik'; 10 – 'Triumph'; 11 – 'Tallon'; M –marker of molecular weight**

Анализ сортов ячменя с использованием ПЦР-маркеров для выявления мутаций, связанных с регуляцией гена *HvAACT1,* показал, что исследуемые генотипы ячменя не имели вставки 1kb-insertion, усиливающей экспрессию гена *HvAACT1*. У всех образцов был получен ампликон 818 п. н. (рис. 2, А), который характерен для чувствительных к токсичным ионам алюминия образцов ячменя [14] или для устойчивых сортов, несущих другие мутации гена *HvAACT1.* Мутация 1kb-insertion (ПЦР-продукт 1841 п. н.), выявленная у алюмотолерантного сорта Murasakimochi, описана преимущественно у генотипов ячменя *H. vulgare*, возделываемых в Восточной Азии [14].

Использование для выявления делеции маркера HvMATE-21indel позволило обнаружить данную мутацию (ПЦР-продукт 475 п. н.) в геноме трёх сортов, характеризующихся алюмоустойчивостью (Новичок, Бионик) и кислотоустойчивостью (Родник Прикамья) (рис. 2, В, дорожки 3, 7, 9). Однако у сортов-регенерантов (Форвард, Витрум) и кислотоустойчивого сорта Дина был выявлен ампликон 495 п. н., совпадающий с таковым у высокоурожайных сортов (Зазерский 85, Triumph, Tallon, Памяти Дудина). Таким образом, исследованные в работе генотипы ячменя, по-видимому, имеют разные механизмы алюмоустойчивости, что представляет интерес для дальнейшего изучения.

Для характеристики фенотипа по признаку алюмоустойчивости широко используемым параметром является ИДК. При выращивании сортов ячменя в контрольных условиях различий по величине средней длины корня не выявлено. В условиях алюмокислого стресса относительно контроля (7,91±1,81 см) снизилась длина корней только у сорта Памяти Дудина (3,51±1,46 см), который характеризуется наименьшим значением ИДК (44,4 %) из всех исследованных генотипов и отнесён к умеренно чувствительным сортам (табл. 2).

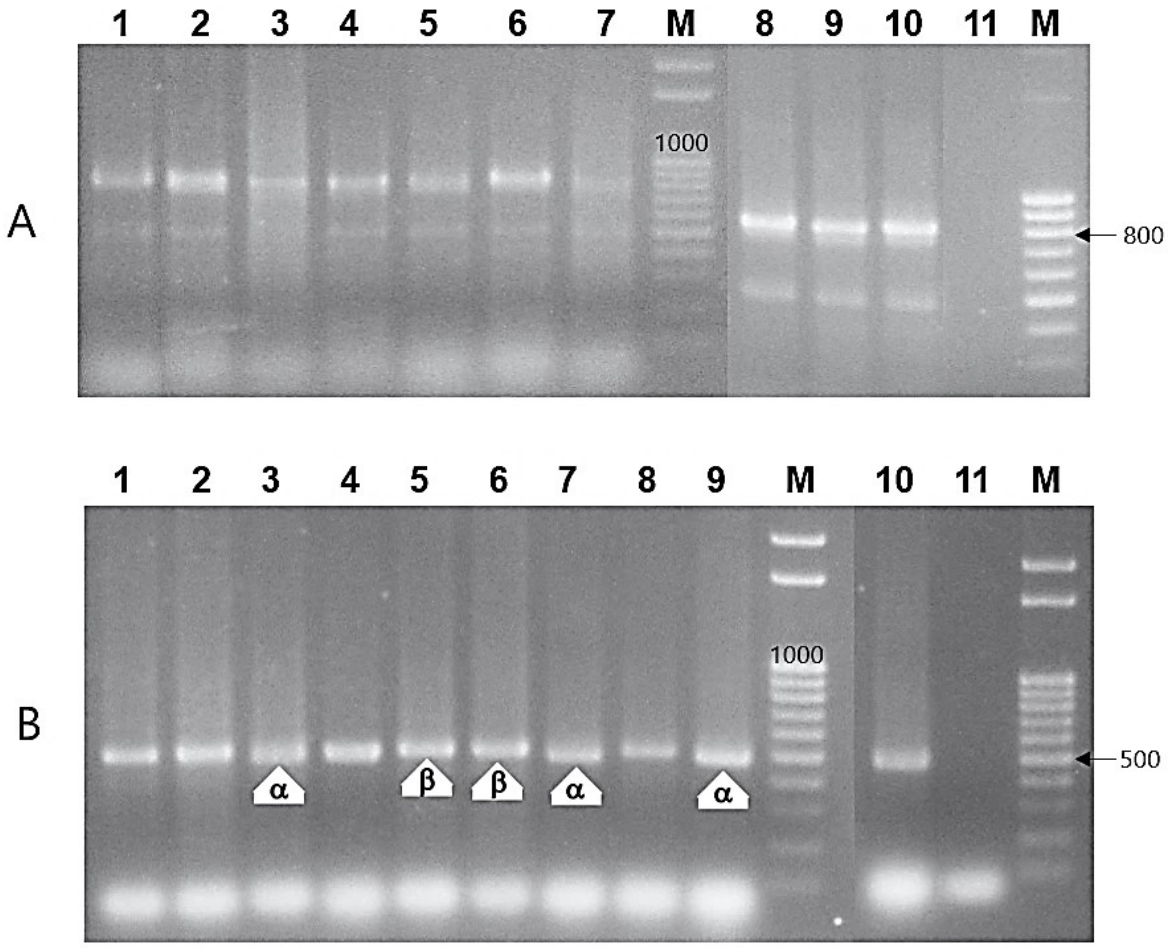


Рис. 2. **Электрофореграммы продуктов ПЦР с праймерами для выявления мутаций гена *HvAACT1:* А) 1kb-insertion (номера дорожек соответствуют образцам ДНК сортов ячменя: 1 – Tallon; 2 – Витрум; 3 – Дина; 4 – Зазерский 85; 5 – Новичок; 6 – Памяти Дудина; 7 – Родник Прикамья; 8 – Triumph; 9 – Бионик; 10 – Форвард; 11 – отрицательный контроль; М – маркер молекулярной массы; В) HvMATE-21indel (номера дорожек соответствуют образцам ДНК генотипов ячменя: 1 – Tallon; 2 – Triumph; 3 – Бионик; 4 – Витрум; 5 – Дина; 6 – Зазерский 85; 7 – Новичок; 8 – Памяти Дудина; 9 – Родник Прикамья; 10 – Форвард; 11 – отрицательный контроль; М – маркер молекулярной массы. Ампликоны, соответствующие наличию мутации (475 п. н.), обозначены буквой «α», «β» – ампликоны 495 п. н.)** /

Fig. 2. **Electrophoregrams of PCR products with primers for detecting *HvAACT1* gene mutations: A) 1kb-insertion (track numbers correspond to DNA samples of barley cultivars: 1 – 'Tallon'; 2 – 'Vitrum'; 3 – 'Dina'; 4 – 'Zazerskij 85'; 5 – ''Novichok; 6 – 'Pamyati Dudina'; 7 – 'Rodnik Prikamiya'; 8 – 'Triumph'; 9 – 'Bionik'; 10 – 'Forvard'; 11 – negative control; M – marker of molecular weight; B) HvMATE-21indel (track numbers correspond to DNA samples of barley genotypes: 1 – 'Tallon'; 2 – 'Triumph'; 3 – 'Bionic'; 4 – 'Vitrum'; 5 – 'Dina'; 6 – 'Zazerskij 85'; 7 – 'Novichok'; 8 – 'Pamyati Dudina'; 9 – 'Rodnik Prikamiya'; 10 – 'Forvard'; 11 – negative control; M – marker of molecular weight. The amplicons corresponding to the presence of the mutation (475 b. p.) are indicated by the letter "α", "β" – amplicons of 495 b. p.)**

Бóльшая часть исследуемых сортов (90 %) по показателю ИДК была отнесена к умеренно устойчивым (Форвард, Новичок, Витрум, Зазерский 85, Tallon) и устойчивым (Дина, Бионик, Родник Прикамья, Triumph) генотипам.

Кроме того, для оценки алюмоустойчивости ячменя была использована методика, основанная на цитологической оценке крахмальных зёрен в клетках корневого чехлика [24]. Согласно данным цитологической оценки, исследуемые сорта ячменя различались по реакции на алюмокислый стресс (табл. 3). К неустойчивым были отнесены сорта, у которых доля корневых чехликов с идентифицированной зоной клеток с окрашенными крахмальными зёрнами (рис. 3, А, С) в условиях стресса снижалась в сравнении с контролем. Так, у сортов Triumph, Родник Прикамья и Памяти Дудина этот показатель в условиях стресса снижался на 80,0 % и более (табл. 4). Также достоверно ($p \leq 0,01$) отличались контрольный и опытный варианты у сорта Бионик: реакция на стресс проявилась в снижении доли корневых чехликов с окрашенной зоной

на 40,0 % от контроля. Не выявлено статистически значимых отличий от контроля по данным цитологических исследований у сортов Дина, Форвард, Новичок, Витрум, Зазерский 85 и Tallon, что позволило отнести их к устойчивым.

Таблица 2 – **Морфометрические показатели корней исследуемых генотипов ячменя в стрессовых и контрольных условиях (n = 150, лабораторный опыт) /**
Table 2 – **Morphometric parameters of the roots of the studied barley genotypes under stress and control conditions (n = 150, laboratory experiment)**

Сорт / Cultivar	*Средняя длина корней, см / Average root length, cm*		*ИДК, % / RLI, %*
	контроль / control	*Al^{3+}*	
‘Triumph’	5,25±2,32	3,87±1,34	73,7
Зазерский 85 / ‘Zazerskij 85’	8,76±2,83	5,54±1,76	63,2
‘Tallon’	7,57±2,67	4,52±1,65	59,7
Витрум / ‘Vitrum’	5,22±1,94	3,32±1,20	63,6
Памяти Дудина / ‘Pamyati Dudina’	7,91±1,81	3,51±1,46*	44,4
Дина / ‘Dina’	5,24±2,02	4,26±1,37	81,3
Бионик / ‘Bionik’	5,5±2,06	4,77±1,34	86,7
Новичок / ‘Novichok’	8,24±2,61	4,55±1,40	55,2
Форвард / ‘Forvard’	7,77±2,08	4,93±1,88	63,4
Родник Прикамья / ‘Rodnik Prikamiya’	8,57±2,67	5,86±1,58	68,4

Примечания: ИДК – индекс длины корней (соотношение средней длины корней – контроль/опыт); * достоверное отличие от контроля /

Notes: RLI – root length index (average root length ratio control/experiment); * significant difference from control

Таблица 3 – **Цитологическая оценка генотипов ячменя по наличию в корневых чехликах окрашенной зоны клеток (n = 15, лабораторный опыт) /**
Table 3 – **Cytological evaluation of barley genotypes based on the presence of a colored cells zone in the root caps (n = 15, laboratory experiment)**

Сорт / Cultivar	*Доля корневых чехликов с окрашенной зоной, % / The proportion of root caps with a colored zone, %*		$\varphi_{эмп}$
	контроль / control	*Al^{3+}*	
‘Triumph’	93,3	13,3*	5,124
Зазерский 85 / ‘Zazerskij 85’	46,7	33,3	0,753
‘Tallon’	66,7	53,3	0,750
Витрум / ‘Vitrum’	66,7	33,3	1,865
Памяти Дудина / ‘Pamyati Dudina’	93,3	13,3*	5,124
Дина / ‘Dina’	60,0	40,0	1,104
Бионик / ‘Bionik’	86,7	46,7*	2,437
Новичок / ‘Novichok’	46,7	66,7	1,112
Форвард / ‘Forvard’	80,0	93,3	1,106
Родник Прикамья / ‘Rodnik Prikamiya’	93,3	6,7*	5,735

* Обозначены варианты, достоверно отличающиеся от контроля при $p \leq 0,01$ ($\varphi_{теор} = 2,31$) /
* The variants that significantly differ from the control at $p \leq 0.01$ are indicated ($\varphi_{theory} = 2.31$)

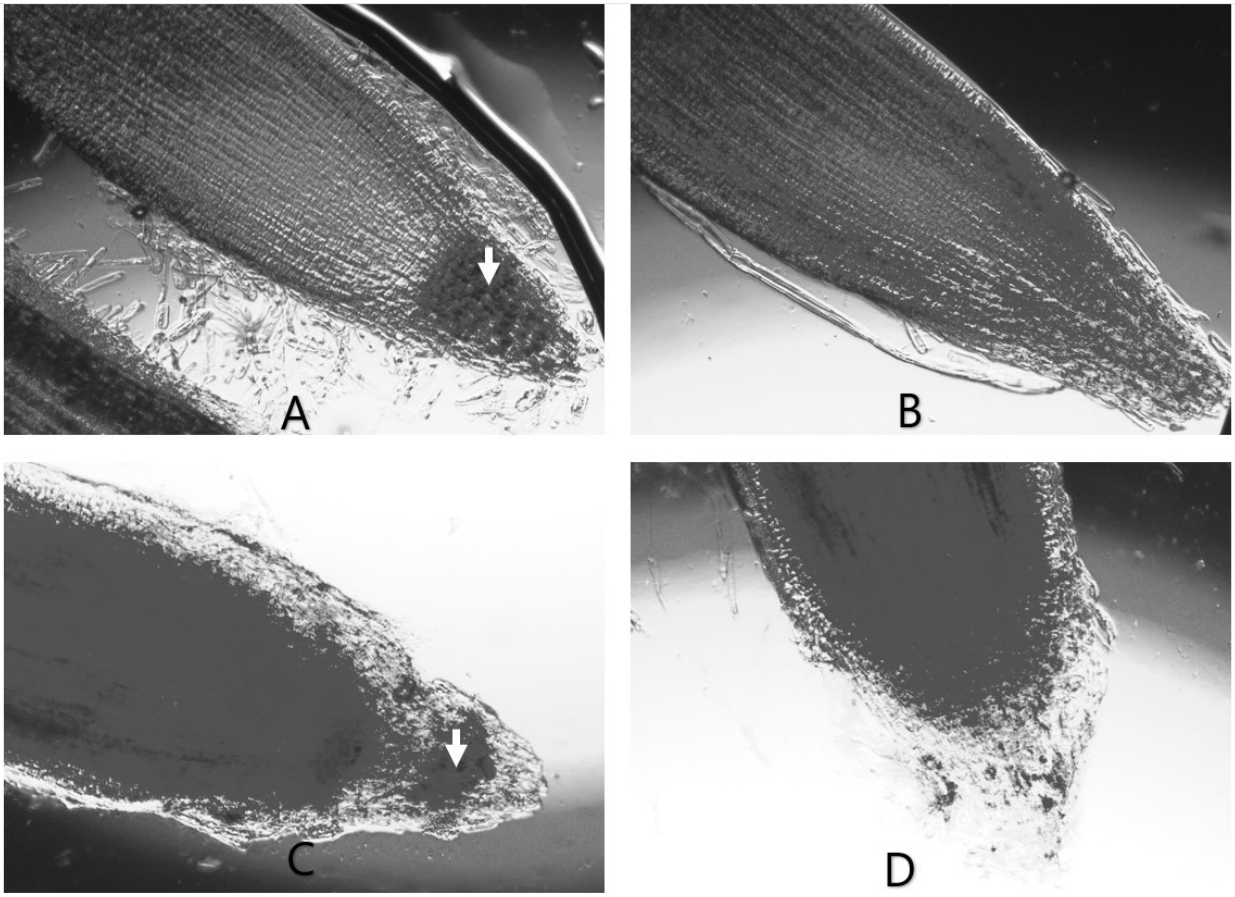


Рис. 3. **Структура корней ячменя (×200) сорта Tallon в контрольных условиях (A, B) и присутствии ионов Al^{3+} (C, D). Стрелками обозначена зона клеток с окрашенными крахмальными зёрнами /**
Fig. 3. **The structure of 'Tallon' barley roots (×200) under control conditions (A, B) and in the presence of Al^{3+} ions (C, D). The arrows indicate the area of cells with colored starch grains**

Стоит отметить, что у сортов Новичок и Форвард в условиях стресса наблюдали увеличение доли корневых чехликов с окрашенной зоной клеток (на 20,0 и 13,3 % от контроля соответственно). У ячменя Новичок ранее было установлено, что он проявляет «алюмозависимость» и его показатели в условиях алюмокислого стресса могут превосходить таковые в контрольных условиях [19].

Таким образом, согласно цитологической оценке, генотипы были распределены на устойчивые и неустойчивые. Однако данные по алюмоустойчивости в лаборатории не всегда совпадали с полученными ранее результатами оценки на почвенных фонах и в полевых условиях [19, 20]. В этой работе мы учитывали образцы, в которых визуализируется зона окрашенных клеток в корневом чехлике, а не её нарушения, но эта оценка может быть недостаточна. На рисунке 3 показана цитологическая картина, наблюдаемая у сорта Tallon, который, согласно ИДК, характеризуется как умеренно устойчивый. Однако зона окрашенных клеток корневого чехлика хорошо визуализируется как в контроле (рис. 3, A), так и в условиях стресса (рис. 3, C), но при этом отсутствует в контроле у других растений этого сорта (рис. 3, B). В то же время в присутствии ионов Al^{3+} корешки этих растений (рис. 3, C, D) имеют признаки стресса, выраженного в деформации клеток, утолщении корня, а также темной окраске меристемы корня, тогда как сам чехлик становится полупрозрачным. Более того оказалось, что в контрольных условиях исследованные сорта различались между собой по доле корневых чехликов, имеющих выраженную зону с окрашенными крахмальными зёрнами (табл. 4). Используемый методический подход требует дальнейшей доработки. Необходима оценка его эффективности с применением широкого ряда генотипов, контрастных по алюмоустойчивости.

В таблице 4 суммированы результаты, полученные при изучении фенотипа и генотипа 10 сортов ячменя. Среди сортов, у которых ранее установлена кислотоустойчивость, у трёх

– был выявлен маркер HvMATE-21indel, сцепленный с алюмоустойчивостью, и все они были отнесены к устойчивым или умеренно устойчивым к Al^{3+} по показателю ИДК. Сорт Памяти Дудина по совокупности лабораторных оценок (ИДК, цитологическая оценка, ДНК-маркеры) характеризовался как неустойчивый к алюмокислому стрессу.

Таблица 4 – **Результаты изучения генотипа и фенотипа 10 сортов ячменя по признаку алюмоустойчивости** / *Table 4* – **Results of studying the genotype and phenotype of 10 barley cultivars according to aluminum resistance trait**

Сорт / Cultivar	*Генотипические различия*/ Genotypic differences*		*Алюмоустойчивость согласно фенотипу**/ Aluminum resistance according to phenotype*	
	HvMATE-21indel	*1kb-insertion*	*ИДК / RLI*	*цитологическая оценка / cytological evaluation*
Новичок / ‘Novichok’	+	-	**MT**	**T**
Дина / ‘Dina’	-	-	**T**	**T**
Форвард / ‘Forvard’	-	-	**MT**	**T**
Бионик / ‘Bionik’	+	-	**T**	**S**
Витрум / ‘Vitrum’	-	-	**MT**	**T**
Родник Прикамья / ‘Rodnik Prikamiya’	+	-	**T**	**S**
Памяти Дудина / ‘Pamyati Dudina’	-	-	**MS**	**S**
‘Triumph’	-	-	**T**	**S**
‘Tallon’	-	-	**MT**	**T**
Зазерский 85 / ‘Zazerskij 85’	-	-	**MT**	**T**

Примечания: * в столбцах знаком «+» обозначено наличие ампликона, соотносимого с алюмоустойчивостью; ** в столбце «ИДК» алюмоустойчивость генотипов обозначена согласно шкале [23] (MS – умеренно чувствительный, MT – умеренно устойчивый, T – устойчивый); в столбце «цитологическая оценка» генотипы разделены на устойчивые (T) и неустойчивые (S) /

Notes: * in the columns the "+" sign indicates the presence of an amplicon correlated with aluminum resistance; ** in the "RLI" column the aluminum resistance of the genotypes is indicated according to the scale [23] (MS – moderately sensitive, MT – moderately tolerant, T – tolerant); in the "cytological evaluation" column the genotypes are separated into tolerant (T) and sensitive (S)

Согласно молекулярно-генетическому анализу, в геноме высокоурожайных сортов зарубежной селекции не обнаружено мутаций в регуляторных областях гена *HvAACT1* с использованием маркеров HvMATE-21indel и 1kb-insertion. Однако фенотипически эти сорта по величине ИДК относены к умеренно устойчивым (Зазерский 85, Tallon) и даже устойчивым (Triumph) генотипам (табл. 4).

Данные цитологической оценки алюмоустойчивости генотипов ячменя также не во всех случаях совпадали с результатом, полученным при анализе ИДК. В то же время распределение сортов на группы по алюмоустойчивости на основании величины ИДК не для всех сортов соответствовало их полевой устойчивости [19, 20]. Этот факт, вероятно, можно объяснить различными адаптационными механизмами для исследованных генотипов. Таким образом, для оценки фенотипа также целесообразно использовать комплекс представленных подходов.

Заключение. Среди использованных в работе ПЦР-маркеров алюмоустойчивости ячменя наиболее перспективным для дальнейших исследований являлся маркер HvMATE-21indel. Применение маркера HVM68 оказалось затруднительно при использовании ПЦР с анализом результатов электрофореза в ПААГ ввиду высокого полиморфизма данного локуса. Поэтому для более точной идентификации аллели, выявляемой маркером HVM68, необходимо проведение фрагментного анализа. Маркер 1kb-insertion легко визуализировался в агарозном геле, но эта мутация промоторной области гена *HvAACT1* является достаточно редкой. Несмотря на то, что ген *HvAACT1* считается основным, связанным с алюмоустойчивостью ячменя, его регуляция осуществляется различ-

ными механизмами, что позволяет использовать несколько ПЦР-маркеров для выявления различных мутаций данного гена. Дальнейшие исследования планируется сосредоточить на анализе как большего набора генотипов ячменя, так и расширении количества ген-специфичных ДНК-маркеров. Представленная методика цитологической оценки перспективна в определении устойчивости генотипа на моделируемый алюмокислый стресс, но требует оптимизации. Для характеристики алюмоустойчивости ячменя по фенотипу целесообразно использовать комплексный подход, включающий как полевые, так и лабораторные оценки.

Список литературы

1. Bian M., Waters I., Broughton S., Zhang X. Q., Zhou M., Lance R. et al. Development of gene-specific markers for acid soil/aluminium tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.). Molecular breeding. 2013;32(1):155–164. DOI: https://doi.org/10.1007/s11032-013-9859-3

2. Fatemi F., Kianersi F., Pour-Aboughadareh A., Poczai P., Jadidi O. Overview of Identified Genomic Regions Associated with Various Agronomic and Physiological Traits in Barley under Abiotic Stresses. Applied Sciences. 2022;12(10):5189. DOI: https://doi.org/10.3390/app12105189

3. Яковлева О. В. Фитотоксичность ионов алюминия. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2018;179(3):315–331. DOI: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2018-3-315-331 EDN: VRVUCP

4. Kochian L., Piñeros M., Hoekenga O. The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity. Planta and Soil. 2005;274:175–195. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-004-1158-7

5. Kochian L., Piñeros M., Liu J., Magalhaes J. Plant adaptation to acid soils: the molecular basis for crop aluminum resistance. Annual Review of Plant Biology. 2015;66:571–598. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043014-114822

6. Jaskowiak J., Tkaczyk O., Slota M., Kwasniewska J., Szarejko I. Analysis of aluminium toxicity in *Hordeum vulgare* roots with an emphasis on DNA integrity and cell cycle. PLoS ONE. 2018;13(2):e0193156. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193156

7. Reid D. A. Genetic potential for solving problems of soil mineral stress: Aluminum and manganese toxicities in cereal grains. In: Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils. Wright M. J. Ed. Cornell University Press: Ithaca, NY, USA, 1976. pp. 55–64. URL: https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19781939706

8. Яковлева О. В. Генетический контроль признака алюмоустойчивости у образцов ярового ячменя. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2025;186(1):170–176. DOI: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2025-1-170-176 EDN: PGAGWI

9. Ma J. F., Nagao S., Sato K., Ito H., Furukawa J., Takeda K. Molecular mapping of a gene responsible for Al-activated secretion of citrate in barley. Journal of Experimental Botany. 2004; 55(401):1335–1341. DOI: https://doi.org/10.1093/jxb/erh152

10. Furukawa J., Yamaji N., Wang H., Mitani N., Murata Y., Sato K., Ma J. F. An aluminum-activated citrate transporter in barley. Plant and Cell Physiology. 2007;48(8):1081–1091. DOI: https://doi.org/10.1093/pcp/pcm091

11. Новоселова Н. В., Бакулина А. В. Молекулярные маркеры в селекции сортов ячменя, устойчивых к ионной токсичности (обзор). Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020;21(1):7–17. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.1.07-17 EDN: MPDYNN

12. Raman H., Karakousis A., Moroni J. S., Raman R., Read B. J., Garvin D. F. et al. Development and allele diversity of microsatellite markers linked to the aluminium tolerance gene *Alp* in barley. Australian Journal of Agricultural Research. 2003;54(12):1315–1321. DOI: https://doi.org/10.1071/AR02226

13. Wang J., Raman H., Zhou M., Ryan P. R., Delhaize E., Hebb D. M. et al. High-resolution mapping of the *Alp* locus and identification of a candidate gene *HvMATE* controlling aluminium tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.). Theoretical and Applied Genetics. 2007;115(2):265–276. DOI: https://doi.org/10.1007/s00122-007-0562-9

14. Fujii M., Yokosho K., Yamaji N., Saisho D., Yamane M., Takahashi H. et al. Acquisition of aluminium tolerance by modification of a single gene in barley. Nature communications. 2012;3(1):713. DOI: https://doi.org/10.1038/ncomms1726

15. Kashino-Fujii M., Yokosho K., Yamaji N., Yamane M., Saisho D., Sato K., Ma J. F. Retrotransposon insertion and DNA methylation regulate aluminum tolerance in European barley accessions. Plant Physiology. 2018; 178(2):716–727. DOI: https://doi.org/10.1104/pp.18.00651

16. Bian M., Jin X., Broughton S., Zhang X. Q., Zhou G., Zhou M., Zhang G. et al. A new allele of acid soil tolerance gene from a malting barley variety. BMC genetics. 2015;16(1):92. DOI: https://doi.org/10.1186/s12863-015-0254-4

17. Леонова И. Н. Молекулярные маркеры: использование в селекции зерновых культур для идентификации, интрогрессии и пирамидирования генов. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2013;17(2):314–325. Режим доступа: https://vavilov.elpub.ru/jour/article/view/153 EDN: RUHMKD

18. Шуплецова О. Н., Товстик Е. В., Щенникова И. Н. Изменение содержания полифенолов в растениях ячменя на стрессовых почвенных фонах. Российская сельскохозяйственная наука. 2023;(6):15–19. DOI: https://doi.org/10.31857/S2500262723060030 EDN: NNMCAD

19. Шуплецова О. Н., Щенникова И. Н. Средообразующая активность корневой системы регенерантов ячменя в условиях токсичности кислых почв. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2018;(4(65)):42–48. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.65.4.42-48

20. Шуплецова О. Н., Щенникова И. Н. Результаты использования клеточных технологий в создании новых сортов ячменя, устойчивых к токсичности алюминия и засухе. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2016;20(5):623–628. DOI: https://doi.org/10.18699/VJ16.183 EDN: WYCWFJ

21. Зайцева И. Ю., Панихина Л. В., Щенникова И. Н., Жилин Н. А. Селекционная ценность мутантных форм ярового ячменя в условиях Волго-Вятского региона. Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2024;(3):49–62. DOI: https://doi.org/10.26897/0021-342X-2024-3-49-62 EDN: ILFAWP

22. Liu Z. W., Biyashev R. M., Maroof M. A. S. Development of simple sequence repeat DNA markers and their integration into a barley linkage map. Theoretical and Applied Genetics. 1996;93(5):869–876. DOI: https://doi.org/10.1007/BF00224088

23. Navakode S., Weidner A., Varshney R. K., Lohwasser U., Scholz U., Röder M. S., Börner A. A genetic analysis of aluminium tolerance in cereals. Agriculturae Conspectus Scientificus. 2010;75(4):191–196.
URL: https://www.researchgate.net/publication/50870030_A_Genetic_Analysis_of_Aluminium_Tolerance_in_Cereals

24. Кононенко Н. В., Чабан И. А., Смирнова Е. А., Широких И. Г., Шуплецова О. Н., Баранова Е. Н. Тестирование устойчивости разных форм ячменя (*Hordeum vulgare* L.) к токсическому действию алюминия. Теоретическая и прикладная экология. 2019;(2):121–130. DOI: https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-2-121-130 EDN: LGPVFJ

25. Park S., Lee D., Baek H. J., Lee J., Farooq M. Study of the genetic diversity of Korean, Chinese and Japanese landraces of barley (*Hordeum vulgare* L.) using microsatellites. Biodiversity: Research and Conservation. 2011;23:3–13. DOI: https://doi.org/10.2478/v10119-011-0018-6

References

1. Bian M., Waters I., Broughton S., Zhang X. Q., Zhou M., Lance R. et al. Development of gene-specific markers for acid soil/aluminium tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.). Molecular breeding. 2013;32(1):155–164.
DOI: https://doi.org/10.1007/s11032-013-9859-3

2. Fatemi F., Kianersi F., Pour-Aboughadareh A., Poczai P., Jadidi O. Overview of Identified Genomic Regions Associated with Various Agronomic and Physiological Traits in Barley under Abiotic Stresses. Applied Sciences. 2022;12(10):5189. DOI: https://doi.org/10.3390/app12105189

3. Yakovleva O. V. Phytotoxicity of aluminum ions. *Trudi po prikladnoy botanike, genetike i selektsii* = Proceedings on applied botany, genetics and breeding. 2018;179(3):315–331. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2018-3-315-331

4. Kochian L., Piñeros M., Hoekenga O. The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity. Planta and Soil. 2005;274:175–195. DOI: https://doi.org/10.1007/s11104-004-1158-7

5. Kochian L., Piñeros M., Liu J., Magalhaes J. Plant adaptation to acid soils: the molecular basis for crop aluminum resistance. Annual Review of Plant Biology. 2015;66:571–598. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043014-114822

6. Jaskowiak J., Tkaczyk O., Slota M., Kwasniewska J., Szarejko I. Analysis of aluminium toxicity in *Hordeum vulgare* roots with an emphasis on DNA integrity and cell cycle. PLoS ONE. 2018;13(2):e0193156.
DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193156

7. Reid D. A. Genetic potential for solving problems of soil mineral stress: Aluminum and manganese toxicities in cereal grains. In: Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils. Wright M. J. Ed. Cornell University Press: Ithaca, NY, USA, 1976. pp. 55–64. URL: https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19781939706

8. Yakovleva O. V. Genetic control of the aluminum resistance trait in barley hybrids. *Trudi po prikladnoy botanike, genetike i selektsii* = Proceedings on applied botany, genetics and breeding. 2025;186(1):170–176. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2025-1-170-176

9. Ma J. F., Nagao S., Sato K., Ito H., Furukawa J., Takeda K. Molecular mapping of a gene responsible for Al-activated secretion of citrate in barley. Journal of Experimental Botany. 2004;55(401):1335–1341. DOI: https://doi.org/10.1093/jxb/erh152

10. Furukawa J., Yamaji N., Wang H., Mitani N., Murata Y., Sato K., Ma J. F. An aluminum-activated citrate transporter in barley. Plant and Cell Physiology. 2007;48(8):1081–1091. DOI: https://doi.org/10.1093/pcp/pcm091

11. Novoselova N. V., Bakulina A. V. Molecular markers in breeding of ion-resistant barley varieties (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2020;21(1):7–17. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.1.07-17

12. Raman H., Karakousis A., Moroni J. S., Raman R., Read B. J., Garvin D. F. et al. Development and allele diversity of microsatellite markers linked to the aluminium tolerance gene *Alp* in barley. Australian Journal of Agricultural Research. 2003;54(12):1315–1321. DOI: https://doi.org/10.1071/AR02226

13. Wang J., Raman H., Zhou M., Ryan P. R., Delhaize E., Hebb D. M. et al. High-resolution mapping of the *Alp* locus and identification of a candidate gene *HvMATE* controlling aluminium tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.). Theoretical and Applied Genetics. 2007;115(2):265–276. DOI: https://doi.org/10.1007/s00122-007-0562-9

14. Fujii M., Yokosho K., Yamaji N., Saisho D., Yamane M., Takahashi H. et al. Acquisition of aluminium tolerance by modification of a single gene in barley. Nature communications. 2012;3(1):713. DOI: https://doi.org/10.1038/ncomms1726

15. Kashino-Fujii M., Yokosho K., Yamaji N., Yamane M., Saisho D., Sato K., Ma J. F. Retrotransposon insertion and DNA methylation regulate aluminum tolerance in European barley accessions. Plant Physiology. 2018;178(2):716–727. DOI: https://doi.org/10.1104/pp.18.00651

16. Bian M., Jin X., Broughton S., Zhang X. Q., Zhou G., Zhou M., Zhang G. et al. A new allele of acid soil tolerance gene from a malting barley variety. BMC genetics. 2015;16(1):92. DOI: https://doi.org/10.1186/s12863-015-0254-4

17. Leonova I. N. Molecular markers: implementation in crop plant breeding for identification, introgression, and gene pyramiding. *Vavilovsky zhurnal genetiki i selektsii* = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2013;17(2):314–325. (In Russ.). URL: https://vavilov.elpub.ru/jour/article/view/153

18. Shupletsova O. N., Tovstik E. V., Shchennikova I. N. Reaction of barley varieties on the content of polyphenols on stress soil backgrounds. *Rossiyskaya selskokhozyaystvennaya nauka*. 2023;(6):15–19. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.31857/S2500262723060030

19. Shupletsova O. N., Shchennikova I. N. Environment-forming activity of barley regenerants root systems in the conditions of acid soils toxicity. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2018;(4(65)):42–48. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.65.4.42-48

20. Shupletsova O. N., Shchennikova I. N. Results of using cell technologies for creation of new barley varieties resistant against aluminum toxicity and drought. *Vavilovsky zhurnal genetiki i selektsii* = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2016;20(5):623–628. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.18699/VJ16.183

21. Zaytseva I. Yu., Panikhina L. V., Shchennikova I. N., Zhilin N. A. Breeding value of mutant forms of spring barley in the conditions of the Volga-Vyatka region. *Izvestiya Timiryazevskoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy. 2024;(3):49–62. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.26897/0021-342X-2024-3-49-62

22. Liu Z. W., Biyashev R. M., Maroof M. A. S. Development of simple sequence repeat DNA markers and their integration into a barley linkage map. Theoretical and Applied Genetics. 1996;93(5):869–876. DOI: https://doi.org/10.1007/BF00224088

23. Navakode S., Weidner A., Varshney R. K., Lohwasser U., Scholz U., Röder M. S., Börner A. A genetic analysis of aluminium tolerance in cereals. Agriculturae Conspectus Scientificus. 2010;75(4):191–196. URL: https://www.researchgate.net/publication/50870030_A_Genetic_Analysis_of_Aluminium_Tolerance_in_Cereals

24. Kononenko N. V., Chaban I. A., Smirnova E. A., Shirokikh I. G., Shupletsova O. N., Baranova E. N. Testing the stability of different forms of *Hordeum vulgare* L. to the toxic action of aluminum. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* = Theoretical and Applied Ecology. 2019;(2):121–130. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-2-121-130

25. Park S., Lee D., Baek H. J., Lee J., Farooq M. Study of the genetic diversity of Korean, Chinese and Japanese landraces of barley (*Hordeum vulgare* L.) using microsatellites. Biodiversity: Research and Conservation. 2011;23:3–13. DOI: https://doi.org/10.2478/v10119-011-0018-6

Вклад авторов:
Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи.

Сведения об авторах

✉ **Бакулина Анна Владимировна**, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник, зав. лабораторией молекулярной биологии и селекции, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», ул. Ленина, д. 166а, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5171-2476**, e-mail: mol-biol@fanc-sv.ru

Бессолицына Екатерина Андреевна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории молекулярной биологии и селекции, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», ул. Ленина, д. 166а, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5582-1709**

Шуплецова Ольга Наумовна, доктор биол. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории биотехнологических методов селекции сельскохозяйственных растений, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», ул. Ленина, 166 а, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4679-0717**

Савинцева Лариса Сергеевна, кандидат биол. наук, научный сотрудник лаборатории молекулярной биологии и селекции, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», ул. Ленина, д. 166а, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7878-4891**

Author contributions:
All authors made significant contributions to the concept development, conduct of the study, and preparation of the article.

Information about the authors

✉ **Anna V. Bakulina,** PhD in Biological Science, senior researcher, Head of the Laboratory of Molecular Biology and Breeding, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Lenin Str., 166a, Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5171-2476,** e-mail: mol-biol@fanc-sv.ru

Ekaterina A. Bessolitsyna, PhD in Biological Science, senior researcher, the Laboratory of Molecular Biology and Breeding, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Lenin Str., 166a, Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5582-1709**

Olga N. Shupletsova, DSc in Biological Science, associate professor, leading researcher, the Laboratory of Biotechnological Methods of Agricultural Plant Breeding, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Lenin Str., 166a, Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4679-0717**

Larisa S. Savintseva, PhD in Biological Science, researcher, the Laboratory of Molecular Biology and Breeding, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Lenin Str., 166a, Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7878-4891**

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.331–339
УДК 633.174:631.52

(cc) BY

Оценка влияния цитоплазматического эффекта на биохимический состав зерна линий сорго

© 2026. В. В. Бычкова✉, О. П. Кибальник, И. А. Сазонова
ФГБНУ «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы», г. Саратов, Российская Федерация

В данной работе проведено исследование биохимического состава (жир, клетчатка, крахмал, белок, безазотистые экстрактивные вещества (БЭВ), танин) в семенах 7 ЦМС-линий зернового сорго с разными типами стерильных цитоплазм (А1, А2, А3, А4, А5, 9Е) с ядерным геномом Карлик 4в и Желотозерное 10, а также 8 линий, закрепляющих стерильность. Растения выращивали в период с 2022 по 2024 г. в условиях Саратовской области. Оценку биохимических показателей зерна проводили с помощью инфракрасного анализатора Spectra Star XT модификации 2600XT-1, содержание танинов в муке сорго определяли по ГОСТ ISO 9648-2013. Установлены значимые различия в биохимическом составе у линий-закрепителей стерильности. Выявлены перспективные линии-закрепители стерильности с высоким содержанием крахмала, клетчатки и БЭВ – КВВ 181; крахмала и жира – КВВ 114; крахмала и БЭВ – КП-70. В среднем за 2022–2024 гг. цитоплазматический эффект на количество изученных биохимических компонентов в зерне изоядерных ЦМС-линий с разными типами стерильных цитоплазм отсутствовал. Исследуемые линии, за исключением изоядерных ЦМС-линий с геномом Карлик 4в, чей уровень был равен или несколько превышал 0,3 % (0,36 % у линии А3 Карлик 4в) в соответствии с пищевыми стандартами, характеризовались низким уровнем танинов от 0,14 до 0,25 %. Установлены сильные отрицательные корреляционные связи между содержанием золы и крахмала (r = -0,72), белком и БЭВ (r = -0,87). Выявлена отрицательная связь танинов с БЭВ (r = -0,61) и положительная – с белком (r = 0,50). Полученные сведения по влиянию цитоплазматического эффекта на биохимический состав зерна сорго позволяют более эффективно использовать выделенные источники в селекционном процессе при создании гибридов зернового сорго в зависимости от направления использования.

Ключевые слова: *цитоплазматическая мужская стерильность, эффект ЦМС, крахмал, протеин, жир, танины*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства сельского хозяйства РФ в рамках Государственного задания (тема № 124020300041-5) и тематического плана ФГБНУ «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы».

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Бычкова В. В., Кибальник О. П., Сазонова И. А. Оценка влияния цитоплазматического эффекта на биохимический состав зерна линий сорго. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):331–339.
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.331-339

Поступила в редакцию: 09.06.2025
Доработана после рецензирования: 15.09.2025
Принята к публикации: 23.03.2026
Опубликована онлайн: 27.04.2026

Assessment of the influence of cytoplasmic effect on the biochemical composition of sorghum grain lines

© 2026. Vera V. Bychkova✉, Oksana P. Kibalnik, Irina A. Sazonova
Russian Research, Design and Technology Institute of Sorghum and Corn, Saratov, Russian Federation

The study reports on an investigation of the biochemical composition (fat, fiber, starch, protein, nitrogen-free extracts (NFE), tannin) in the seeds of 7 CMS grain sorghum lines with different types of sterile cytoplasm (A1, A2, A3, A4, A5, 9E) with the nuclear genome Karlik 4v and Zhelotozernoye 10, as well as 8 sterility-maintaining lines. The plants were grown from 2022 to 2024 in the Saratov region. The biochemical parameters of the grain were assessed using a Spectra Star XT 2600XT-1 infrared analyzer. The tannin content was determined in sorghum flour according to GOST ISO 9648-2013. There were found significant deviations in the biochemical composition of the sterility- maintaining lines. Promising sterility-maintaining lines were identified: KVV 181 (high in starch, fiber and NFE); KVV 114 (high in starch and fat); KP-70 (high in starch and NFE). On average for 2022–2024, there was no cytoplasmic effect on the amount of the studied biochemical components in the grain of isonuclear CMS lines with different types of sterile cytoplasm. The studied lines, with the exception of isonuclear CMS lines with the Karlik 4v genome, whose level was equal to or slightly exceeded 0.3 % (0.36 % in the A3 Karlik 4v line) in relation to food standards, were characterized by a low level of tannins from 0.14 to 0.25 %. Strong negative correlations were found between ash and starch content (r = -0.72), as well as between protein and NFE (r = -0.87). A negative correlation was found between tannins and NFE (r = -0.61) and a positive correlation was found between tannins and protein (r = 0.50). The obtained data on the influence of the cytoplasmic effect on the biochemical composition of sorghum grain allow for more effective use of these sources in the breeding process when creating grain sorghum hybrids, depending on the intended use.

Keywords: *cytoplasmic male sterility, CMS effect, starch, protein, fat, tannins*

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation within the state assignment (topic No. 124020300041-5) and the thematic plan of Russian Research, Design and Technology Institute of Sorghum and Corn

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors stated that there was no conflict of interest.

For citation: Bychkova V. V., Kibalnik O. P., Sazonova I. A. Assessment of the influence of cytoplasmic effect on the biochemical composition of sorghum grain lines. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):331–339. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.331-339

Received: 09.06.2025
Revised: 15.09.2025
Accepted for publication: 23.03.2025
Published online: 27.04.2026

Сорго (*Sorghum bicolor* L.) занимает важное место в агропромышленном комплексе благодаря своей устойчивости к неблагоприятным климатическим условиям, разнообразию использования и высокой питательной ценности. Эта культура широко используется в качестве источника продовольствия, корма для животных и промышленного сырья [1, 2].

В последние годы внимание исследователей сосредоточено на создании гибридов сорго, что стало возможным благодаря использованию линий с цитоплазматической мужской стерильностью (ЦМС-линий), которые обеспечивают высокий уровень генетического разнообразия. В условиях изменяющегося климата и глобальных вызовов продовольственной безопасности важным направлением исследований является оценка генетического разнообразия ЦМС-линий, которые могут обладать уникальными биохимическими характеристиками. ЦМС-линии представляют собой важный инструмент в селекции, позволяющий создавать новые гибриды с улучшенными агрономическими характеристиками, такими как высокая питательная ценность, урожайность, устойчивость к заболеваниям и неблагоприятным погодным условиям [3, 4].

Одним из ключевых аспектов, на который следует обратить внимание в селекции данной культуры, является биохимический состав зерна, включающий содержание питательных веществ и антиоксидантов, в частности танины. Танины представляют собой полифенольные соединения, которые, в зависимости от концентрации, могут оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на усвоение питательных веществ. Например, доказано стимулирующее действие танинов в качестве защитного барьера против патогенов, в то время как высокое их содержание в зерне сорго оказывает негативное влияние на усвояемость пищи и здоровье домашних животных [5, 6, 7]. Этот эффект возникает вследствие способности танинов образовывать прочные связи с макромолекулами – белками и полисахаридами [8]. Поэтому рекомендуется соблюдать нормы содержания танинов, превышение которых может вызвать потерю веса у животных. Что касается здоровья человека, считается, что танины сорго могут быть полезными. Молекулярное взаимодействие танинов с крахмалом, белками и ферментами, связанное с их высокой антиоксидантной активностью, снижает усвояемость, а следовательно, и потребление калорий, принося пользу при ожирении и диабете 2-го типа в дополнение к другим преимуществам для здоровья, таким как противораковое и противовоспалительное действия [1, 9, 10, 11].

Вместе с тем включение в селекционный процесс по созданию гибридов сорго стерильных линий с различными типами ЦМС способствует расширению генетического разнообразия исходного материала, в том числе по содержанию танинов и других биохимических компонентов, что дает больше возможностей для оптимизации состава и питательной ценности зерна сорго при использовании в пищевой и кормовой промышленности.

Цель исследований – определить содержание основных биохимических компонентов, включая танин, в зерне образцов сорго, оценить влияние цитоплазматического эффекта у ЦМС-линий с разными типами стерильных цитоплазм на биохимический состав зерна.

Новизна исследований – впервые выявлено влияние стерильной цитоплазмы типа А3 на накопление танинов в зерне ЦМС-линий сорго с геномом Карлик 4в, тогда как у ЦМС-линий с геномом Желтозерное 10 эффект отсутствовал; определен биохимический состав и содержание танинов образцов, закрепляющих стерильность. Полученные результаты способствуют выявлению перспективного исходного материала, который может быть использован для селекции новых гибридов с улучшенными питательными свойствами и оптимальным содержанием танинов.

Материал и методы. В качестве объектов исследований использовали 7 ЦМС-линий зернового сорго с разными типами стерильных цитоплазм (А1 Карлик 4в, А2 Карлик 4в, А3 Карлик 4в, А5 Карлик 4в, А3 Желтозерное 10, А4 Желтозерное 10, 9Е Желтозерное 10) и 8 линий, закрепляющих стерильность (Карлик 4в, КП 70, КВВ 114, ВИР 120, Судзерн, Ефремовское 2, Фетерита 14, КВВ 181). Образцы высевали во II–III декадах мая на опытном поле ФГБНУ РосНИИСК «Россорго» (Саратовская область) в течение 2022–2024 гг. селекционной кассетной сеялкой СКС-6-10, агротехника выращивания – зональная. Площадь делянки составляла 7,7 м^2. Густота стояния растений соответствовала 100 тыс. шт/га. Повторность трехкратная[1]. Для изучения цитоплазматического эффекта на биохимический состав зерна ЦМС-линий использовали соцветия с растений, зерно на которых завязалось в условиях свободного опыления. Выращивание в режиме свободного опыления среди сотен тысяч фертильных растений ежегодно обеспечивало 100%-ю завязываемость всех метелок исследуемых стерильных линий. Данный подход применяли в своих исследованиях Дж. Л. Моран и У. Л. Руни (J. L. Moran and W. L. Rooney) [12].

Оценка биохимического состава зерна сорго проведена на инфракрасном анализаторе Spectra Star XT модификации 2600XT-1 (Unity Scientific, США) методом спектроскопирования. Для определения содержания танинов пользовались методикой ГОСТ ISO 9648-2013[2], основанной на экстрагировании танинов из муки сорго диметилформамидом с последующим определением оптической плотности полученного экстракта на спектрофотометре Промэколаб ПЭ-5300В (ПромЭкоЛаб, Китай) при длине волны 525 нм в трехкратной повторности.

Статистическая обработка данных была проведена с помощью пакета программ Agros 2.09 методами дисперсионного и корреляционного анализов.

Результаты и их обсуждение. Биохимический анализ изученных линий-закрепителей стерильности показал значимые различия между ними по содержанию крахмала (71,38–74,44 %), жира (3,55–4,08 %), клетчатки (1,30–2,25 %) и БЭВ (78,67–80,17 %) (табл. 1). Вместе с тем существенных различий по содержанию белка и минеральных веществ в зерне не обнаружено, значение признаков составило 11,20–12,72 и 0,85–1,45 % соответственно.

Таблица 1 – **Основные биохимические компоненты зерна у ряда линий-закрепителей новых типов стерильных цитоплазм сорго, % (среднее за 2022–2024 гг.) /**
Table 1 – **Main biochemical components of grain in a number of lines-maintainers of new types of sterile cytoplasms of sorghum, % (average for 2022–2024)**

Образец / Sample	*Крахмал / Starch*	*Белок / Protein*	*Жир / Fat*	*Зола / Ash*	*Клетчатка / Fiber*	*БЭВ / NFE*
КП 70 / KP 70	73,97 bc	12,32	3,67 abc	1,20	1,52 ab	80,17 c
КВВ 114 / KVV 114	74,34 c	12,26	4,08 d	0,85	1,30 a	79,71 c
ВИР 120 / VIR 120	72,54 abc	12,72	3,99 cd	0,98	1,66 ab	78,67 a
Судзерн / ‘Sudzern’	72,03 ab	12,37	3,91 bcd	1,25	1,70 ab	79,90 c
Ефремовское 2 / ‘Efremovskoe 2’	73,39 abc	12,53	3,91 bcd	1,16	1,91 bcd	78,86 a
Фетерита 14 / ‘Feterita 14’	71,38 a	12,09	3,60 ab	1,45	2,17 cd	79,69 bc
КВВ 181 / KVV 181	74,44 c	11,20	3,55 a	1,28	2,25 d	80,01 c
F_{05}	3,78*	1,98	3,89*	0,94	4,35*	4,22*
$НСР_{05}$ / LSD_{05}	1,91	-	0,30	-	0,38	0,72

* $p<0,05$; данные по каждой гибридной комбинации, обозначенные разными буквами, значимо различаются при $p<0.05$ в соответствии с Тестом множественных сравнений Дункана /

* $p<0.05$; data for each hybrid combination, denoted by different letters, are significantly different at $p<0.05$ according to Duncan's Multiple Range Test

[1]Шепель Н. А. Селекция и семеноводство гибридного сорго. Ростов-на-Дону, 1985. 256 с.
[2]ГОСТ ISO 9648-2013. Сорго. Метод определения содержания танинов. М.: Стандартинформ, 2013. 11 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293776/4293776536.pdf

В 2023 г. был проведен анализ по определению содержания танинов в муке сорго (рис. 1). В соответствии с Широким унифицированным классификатором возделываемых видов рода *Sorghum bicolor* Moench (L.)[3], содержание танинов на стадии полной спелости варьировало в пределах: 1 – почти отсутствует; 3 – низкое (< 1,0 %); 5 – среднее (1,0-2,0 %); 7 – высокое (> 2,0 %). Таким образом, все изученные линии содержали низкий уровень танина. В то же время, согласно пищевому стандарту на зерно сорго, разработанному Комиссией «Кодекс Алиментариус», содержание танина в зерне и муке не должно превышать 0,5 и 0,3 % в пересчете на сухое вещество соответственно[4]. Следовательно. этому стандарту соответствуют все изученные линии, у которых содержание танина было ниже 0,3 % и варьировало в пределах 0,14–0,25 %. Наименьшее значение признака установлено у линий КВВ 114 и ВИР 120.

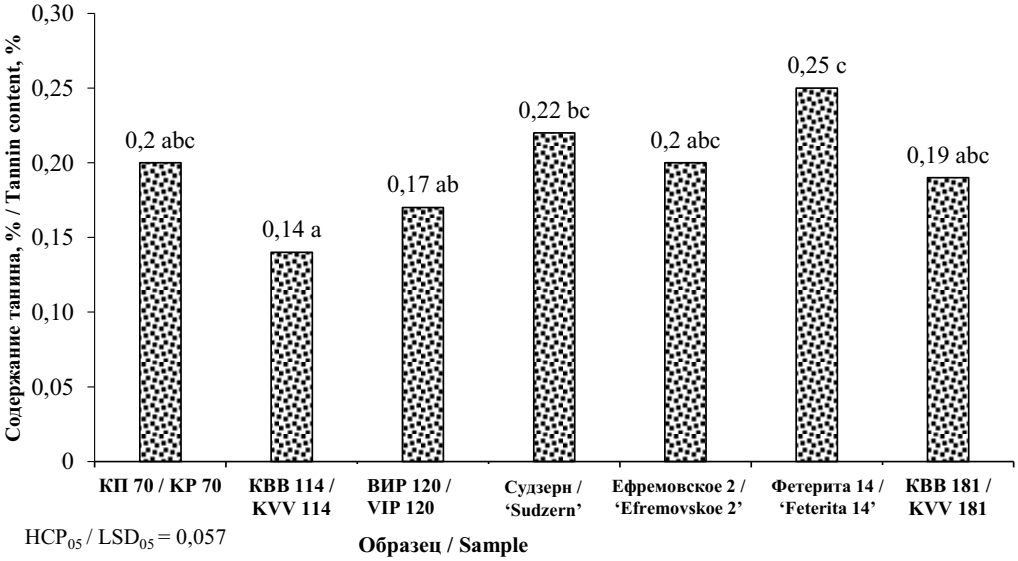


Рис 1. **Содержание танина у линий-закрепителей стерильности зернового сорго, % (2023 г.)** (данные по каждой линии, обозначенные разными буквами, значимо различаются при p<0.05 в соответствии с тестом множественных сравнений Дункана) /

Fig 1. **Tannin content in lines-sterility maintainers of grain sorghum, % (2023)** (data for each line, denoted by different letters, are significantly different at p<0.05 according to Duncan's Multiple Range test)

Не менее значимым является выявление цитоплазматического эффекта на содержание биохимических компонентов зерна ЦМС-линий, имеющих один и тот же ядерный геном и различающихся только типом стерильных цитоплазм. Такие исследования провели на двух наборах ЦМС-линий: с геномом Карлик 4в (на основе цитоплазм А1, А2, А3, А4, А5) и Желтозерное 10 (на основе цитоплазм А3, А4, 9Е).

Однофакторный дисперсионный анализ показал отсутствие значимых различий ($F_{05} \leq F_{теор.}$) между изоядерными ЦМС-линиями по содержанию основных биохимических компонентов зерна в среднем за 3 года (табл. 2). Среди ЦМС-линий с геномом Карлик 4в отмечена (не доказанная математически) тенденция повышения содержания крахмала и БЭВ на цитоплазме А3, белка – на цитоплазме А1 и у закрепителя стерильности, жира и золы – цитоплазме А5; среди ЦМС-линий с геномом Желтозерное 10 – крахмала, белка, золы и клетчатки на цитоплазме А4.

Хотя предыдущие исследования показали значимый цитоплазматический эффект на содержание белка и крахмала у линий с геномом Желтозерное 10 в зависимости от условий внешней среды [14, 15].

В 2023 г. проведен анализ по определению содержания танинов в муке сорго ЦМС-линий с геномом Желтозерное 10 на цитоплазмах А3, А4 и 9Е и с геномом Карлик 4в на цитоплазмах А1, А2, А3, А4, А5 (рис. 2). Исследования показали наличие значимого цитоплазматического эффекта в наборе линий с геномом Карлик 4: наименьшее значение танинов выявлено в зерне закрепителя стерильности (0,25 %), наибольшее – у ЦМС-линии с цитоплазмой А3 (0,36 %).

[3]Якушевский Е. С., Варадинов С. Г., Корнейчук В. А. Широкий унифицированный классификатор СЭВ и международный классификатор СЭВ возделываемых видов рода *Sorghum Moench*. СССР, Л. Баняи (ВНР). Л.: ВНИИР им. Н. И. Вавилова (ВИР), 1982. 34 с.

[4]Стандарт на зерно сорго CXS 172-1989. Принят в 1989 году. Пересмотрен в 1995 году. С изменениями 2019 г. URL: https://fczerna.ru/upload/iblock/efa/efa3bd5d27cc584cefa8416f63a1f5ee.pdf

Таблица 2 – **Характеристика изоядерных ЦМС-линий сорго с разными типами стерильных цитоплазм по основным биохимическим компонентам зерна, % (среднее за 2022–2024 гг.) /**
Table 2 – **Characteristics of isonuclear CMS sorghum lines with different types of sterile cytoplasms by the main biochemical components of grain, % (average for 2022–2024)**

Образец / Sample	*Крахмал / Starch*	*Белок / Protein*	*Жир / Fat*	*Зола / Ash*	*Клетчатка / Fiber*	*БЭВ / NFE*
С геномом Карлик 4в / With the genome of the Karlik 4v						
Карлик 4в – закрепитель стерильности / Karlik 4v – sterility maintaner	71,26	13,39	4,01	1,31	1,85	78,08
A1 Карлик 4в / A1Karlik 4v	70,97	13,38	3,90	2,16	1,89	78,52
A2 Карлик 4в / A2 Karlik 4v	70,84	13,33	3,69	1,33	1,65	78,81
A3 Карлик 4в / A3 Karlik 4v	72,32	12,65	3,88	1,25	1,92	78,62
A4 Карлик 4в / A4 Karlik 4v	71,46	13,24	3,68	1,12	1,58	79,38
A5 Карлик 4в / A5 Karlik 4v	70,77	13,36	4,13	2,18	1,78	78,16
F_{05} ($F_{05} \leq F_{теор.}$)	0,96	0,42	1,45	1,32	0,75	1,32
С геномом Желтозерное 10 / With the genome of the Zheltozernoe 10						
A3 Желтозерное 10 / A3 Zheltozernoe 10	72,55	11,37	3,66	1,48	1,36	81,19
A4 Желтозерное 10 / A4 Zheltozernoe 10	73,33	11,52	3,39	1,52	1,50	81,27
9E Желтозерное 10 / 9E Zheltozernoe 10	73,20	11,02	3,35	1,47	1,49	81,57
F_{05} ($F_{05} \leq F_{теор.}$)	0,43	0,54	2,87	0,22	0,84	0,51
Среднее и ее ошибка / Mean and its error	71,85±0,33	12,58±0,33	3,74±0,09	1,54±0,13	1,67±0,07	79,51±0,48

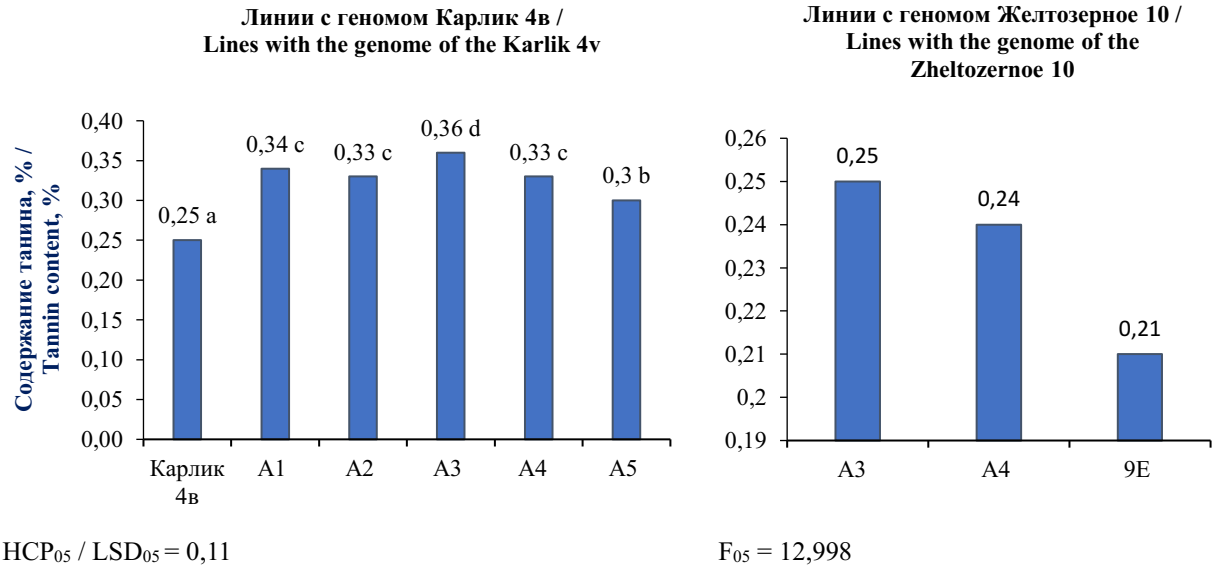


Рис 2. **Содержание танина в зерне стерильных линий сорго с разными типами ЦМС, % (2023 г.)** (данные по каждой линии, обозначенные разными буквами, значимо различаются при $p<0,05$ в соответствии с тестом множественных сравнений Дункана) /

Fig 2. **Tannin content in grain of sterile sorghum lines with different types of CMS, % (2023)** (data for each line, denoted by different letters, are significantly different at $p<0.05$ according to Duncan's Multiple Range test)

Для ускорения селекционного процесса важно обнаружить наиболее тесные зависимости между морфометрическими, биохимическими показателями и элементами структуры урожая. В настоящее время исследовано влияние цвета и окраски зерна сорго [16, 17], а также морфометрических показателей [18] на содержание танина. Взаимосвязь между основными биохимическими компонентами зерна и танинами не определяли.

В этой связи проведен анализ корреляционных взаимодействий изучаемых признаков у исследуемых образцов сорго (табл. 3). Выявлена обратная сильная корреляционная связь между параметрами золы и крахмала (r = -0,72); белка и БЭВ (r = -0,87). Средняя отрицательная корреляция отмечена между жиром и БЭВ (r = -0,53), а также белком и крахмалом (r = -0,52). Аналогичные результаты исследований были получены в других наших работах при изучении корреляционной связи между биохимическими параметрами у сортов зернового сорго [19, 20]. В данной работе обнаружена средняя отрицательная корреляционная связь между содержанием танинов и БЭВ (r = -0,61) и средняя положительная – белка и танинов (r = 0,50). Выявленные закономерности необходимо учитывать в дальнейшей селекционной работе на улучшение питательности сорго.

Таблица 3 – **Матрица коэффициентов корреляции (2023 г.) /**
Table 3 – **Correlation coefficient matrix (2023)**

Показатель / Indicator	*Жир / Fat*	*Зола / Ash*	*Клетчатка / Fiber*	*Крахмал / Starch*	*Белок / Protein*	*БЭВ / NFE*	*Танин / Tannin*
Жир / Fat	1.00	-	-	-	-	-	-
Зола / Ash	-0.42	1.00	-	-	-	-	-
Клетчатка / Fiber	-0.08	-0.14	1.00	-	-	-	-
Крахмал / Starch	-0.07	-0.72**	0.16	1.00	-	-	-
Белок / Protein	0.43	0.01	-0.14	-0.52*	1.00	-	-
БЭВ / NFE	-0.53*	0.19	-0.30	0.31	-0.87**	1.00	-
Танин / Tannin	0.12	0.13	0.42	-0.42	0.50*	-0.61*	1.00

* Значимо на 5%-м уровне; ** значимо на 1%-м уровне; отсутствие символа * указывает на незначимость коэффициента /

* Significant at 5% level; ** significant at 1% level; lack of symbol * indicates the insignificance of the coefficient

Заключение. Проведённые исследования показали, что изученные линии-закрепители стерильности сорго характеризуются существенной вариабельностью по ряду биохимических признаков, в частности по содержанию крахмала (71,38–74,44 %), жира (3,55–4,08 %), клетчатки (1,30–2,25 %) и безазотистых экстрактивных веществ (78,86–80,17 %). В то же время среди этих линий существенных различий по содержанию белка и минеральных веществ не обнаружено. Выявлены селекционно-ценные линии для селекции гибридов сорго пищевого и технологического направления использования: с высоким содержанием крахмала, клетчатки и БЭВ – линия КВВ 181; высоким уровнем крахмала и жира – линия КВВ 114; высоким содержанием крахмала и БЭВ – линия КП-70; повышенным содержанием белка – линия ВИР 120. Анализ содержания танинов показал, что у линий-закрепителей стерильности, а также ЦМС-линий на основе генома Желтозерное 10 значения находятся в пределах 0,14–0,25 %, то есть соответствуют требованиям международного стандарта на пищевые продукты. Статистический анализ показал отсутствие значимых различий между изоядерными ЦМС-линиями как с геномом Карлик 4в, так и Желтозерное 10 по основным биохимическим компонентам зерна. В условиях 2023 г. выявлено положительное влияние цитоплазмы А3 на накопление танинов у ЦМС-линии с геномом Карлик 4в (0,36 %). Полученные сведения важно учитывать в дальнейшей селекционной работе при создании гибридов пищевого направления. Анализ корреляционных взаимодействий показал сильную отрицательную связь между содержанием золы и крахмала, а также белком и БЭВ. Корреляционные связи между танинами и биохимическими показателями показывают наличие отрицательной связи с БЭВ и положи-

тельной – с белком. Таким образом, настоящее исследование является важным шагом в направлении селекции высокопродуктивных и качественных гибридов зернового сорго, пригодных для использования с учетом потребностей продовольственной безопасности.

Список литературы

1. Assefa A., Bezabih A., Girmay G., Alemayehu T., Lakew A. Evaluation of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) *Moench*) variety performance in the lowlands area of wag lasta, north eastern Ethiopia. Cogent Food & Agriculture. 2020;6(1):1778603. DOI: https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1778603

2. Junior M. O., Vendramini J., Erickson J., Moriel P., Silveira M., Aguiar A. et al. Nutritive value and fermentation characteristics of silages produced from diferent sweet sorghum plant components with or without microbial inoculation. Applied Animal Science. 2020;36(6):777–783. DOI: https://doi.org/10.15232/aas.2020-02027

3. Кибальник О. П. Влияние типа стерильной цитоплазмы на селекционно-ценные признаки гибридов F1 сорго в различных по влагообеспеченности условиях. Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2023;(3):62–72. DOI: https://doi.org/10.26897/0021-342X-2023-3-62-72 EDN: BHCGRJ

4. Кибальник О. П., Ларина Т. В., Каменева О. Б., Семин Д. С. Оценка засухоустойчивости ЦМС-линий сорго на основе различных источников стерильности. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2021;182(4):9–17. DOI: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2021-4-9-17 EDN: BLQLPP

5. Hanaka A., Dresler S., Mułenko W., Wojciak M., Sowa I., Sawic M. et al. Phenolic-based discrimination between non-symptomatic and symptomatic leaves of *Aesculus hippocastanum* infested by *Cameraria ohridella* and *Erysiphe flexuosa*. International Journal of Molecular Sciences. 2023;24(18):14071.
DOI: https://doi.org/10.3390/ijms241814071

6. Feng K., Tang F., Zhang Y., Nong M. L. Transcriptome profiling of *Micromelalopha troglodyta* (Lepidoptera: Notodontidae) larvae under tannin stress using solexa sequencing technology. Journal of Entomological Science. 2021;56(3):321–342. DOI: https://doi.org/10.18474/JES20-48

7. Ducksbury C., Neale E. P., Stefoska-Needham A. The effect of sorghum consumption on markers of chronic disease: A systematic review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2022;63(2):159–177.
DOI: https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1944976

8. Jingyi Y., Reddy C. K., Fan Z., Xu B. Physicochemical and structural properties of starches from non-traditional sources in China. Food Science and Human Wellness. 2023;12(2):416–423.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.fshw.2022.07.043

9. Espitia-Hernández P., Chavez Gonzalez M. L., Ascacio-Valdés J. A., Dávila-Medina D., Flores-Naveda A., Silva T. et al. Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) as a potential source of bioactive substances and their biological properties. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2022;62(8):2269–2280.
DOI: https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1852389

10. Li Z., Zhao X., Zhang X., Liu H. Bioactive Compounds and Biological Activities of Sorghum Grains. Foods. 2021;10(11):2868. DOI: https://doi.org/10.3390/foods10112868

11. Taylor J. R., Duodu K. G. Resistant-type starch in sorghum foods–Factors involved and health implications. Starch-Stärke. 2023;75(9–10):2100296. DOI: https://doi.org/10.1002/star.202100296

12. Moran J. L., Rooney W. L. Effect of cytoplasm on the agronomic performance of grain sorghum hybrids. Crop Science. 2003;43(3):777–781. DOI: https://doi.org/10.2135/cropsci2003.0777

13. Zhao W., Liu Y., Zhou K., Li K., Shen J. How sorghum grain composition affects the quality of Chinese Baijiu - a comprehensive review. Journal of Food Composition and Analysis. 2024;(134):106512.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106512

14. Бычкова В. В. Эльконин Л. А. Изучение влияния типа стерильной цитоплазмы на содержание белка у линий и гибридов зернового сорго. Научное обеспечение устойчивого развития агропромышленного комплекса в условиях аридизации климата: мат-лы II Междунар. науч.-практ. конф. (24-25 марта 2022 г.). Саратов: ООО «Амирит», 2022. С. 28–32.
Режим доступа: https://kpfu.ru/staff_files/F1289277269/SBORNIK_MATERIALOV_Konferenciya_MART_2022_FGBNU_RosNIISK_Rossorgo.pdf

15. Бычкова В. В. Эльконин Л. А. Изучение влияния типа стерильной цитоплазмы на содержание крахмала у линий и гибридов зернового сорго. Научное обеспечение устойчивого развития агропромышленного комплекса в условиях аридизации: мат-лы II Междунар. науч.-практ. конф. (24-25 марта 2022 г.). Саратов: ООО «Амирит», 2022. С. 23–27.
Режим доступа: https://kpfu.ru/staff_files/F1289277269/SBORNIK_MATERIALOV_Konferenciya_MART_2022_FGBNU_RosNIISK_Rossorgo.pdf

16. Ковтунов В. В., Ковтунова Н. А., Кравченко Н. С. Антиоксидантные свойства зерна сорго. Достижения науки и техники АПК. 2019;33(6):37–39. DOI: https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10609 EDN: EXTKLY

17. Kurniawan H., Dwiatmini K. Tannin content diversity in sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.) germplasm. International conference on organic and applied chemistry (ICOAC) 2022. AIP Conference Proceedings. 2024;2957(1):060005. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0183913

18. Sedghi M., Golian A., Soleimani-Roodi P., Ahmadi A., Aami-Azghadi M. Relationship between color and tannin content in sorghum grain: application of image analysis and artificial neural network. Revista Brasileira de Ciência Avícola. 2012;14(1):57–62. DOI: https://doi.org/10.1590/S1516-635X2012000100010

19. Бычкова В. В., Кибальник О. П., Сазонова И. А., Каменева О. Б. Влияние метеорологических условий года на биохимический состав зерна сорго. Аграрная наука. 2023;(12):102–107.
DOI: https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-377-12-102-107 EDN: ELWENK

20. Кибальник О. П., Бычкова В. В., Ерохина А. В. Использование корреляционного анализа в селекции зернового сорго для засушливых регионов. Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2024;(3(77)):36–44. DOI: https://doi.org/10.24411/2078-1318-2024-3-36-44 EDN: PLGAXU

References

1. Assefa A., Bezabih A., Girmay G., Alemayehu T., Lakew A. Evaluation of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) *Moench*) variety performance in the lowlands area of wag lasta, north eastern Ethiopia. Cogent Food & Agriculture. 2020;6(1):1778603. DOI: https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1778603

2. Junior M. O., Vendramini J., Erickson J., Moriel P., Silveira M., Aguiar A. et al. Nutritive value and fermentation characteristics of silages produced from diferent sweet sorghum plant components with or without microbial inoculation. Applied Animal Science. 2020;36(6):777–783. DOI: https://doi.org/10.15232/aas.2020-02027

3. Kibalnik O. P. Effect of sterile cytoplasm type on valuable breeding traits of F1 sorghum hybrids under diff erent moisture conditions. *Izvestiya Timiryazevskoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy. 2023;(3):62–72. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.26897/0021-342X-2023-3-62-72

4. Kibalnik O. P., Larina T. V., Kameneva O. B., Semin D. S. Assessment of drought resistance in sorghum CMS lines based on various sterility sources. *Trudi po prikladnoy botanike, genetike i selektsii* = Proceedings on applied botany, genetics and breeding. 2021;182(4):9–17. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.30901/2227-8834-2021-4-9-17

5. Hanaka A., Dresler S., Mułenko W., Wojciak M., Sowa I., Sawic M. et al. Phenolic-based discrimination between non-symptomatic and symptomatic leaves of *Aesculus hippocastanum* infested by *Cameraria ohridella* and *Erysiphe flexuosa*. International Journal of Molecular Sciences. 2023;24(18):14071.
DOI: https://doi.org/10.3390/ijms241814071

6. Feng K., Tang F., Zhang Y., Nong M. L. Transcriptome profiling of *Micromelalopha troglodyta* (Lepidoptera: Notodontidae) larvae under tannin stress using solexa sequencing technology. Journal of Entomological Science. 2021;56(3):321–342. DOI: https://doi.org/10.18474/JES20-48

7. Ducksbury C., Neale E. P., Stefoska-Needham A. The effect of sorghum consumption on markers of chronic disease: A systematic review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2022;63(2):159–177.
DOI: https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1944976

8. Jingyi Y., Reddy C. K., Fan Z., Xu B. Physicochemical and structural properties of starches from non-traditional sources in China. Food Science and Human Wellness. 2023;12(2):416–423.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.fshw.2022.07.043

9. Espitia-Hernández P., Chavez Gonzalez M. L., Ascacio-Valdés J. A., Dávila-Medina D., Flores-Naveda A., Silva T. et al. Sorghum (*Sorghum bicolor* L.) as a potential source of bioactive substances and their biological properties. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2022;62(8):2269–2280.
DOI: https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1852389

10. Li Z., Zhao X., Zhang X., Liu H. Bioactive Compounds and Biological Activities of Sorghum Grains. Foods. 2021;10(11):2868. DOI: https://doi.org/10.3390/foods10112868

11. Taylor J. R., Duodu K. G. Resistant-type starch in sorghum foods–Factors involved and health implications. Starch-Stärke. 2023;75(9–10):2100296. DOI: https://doi.org/10.1002/star.202100296

12. Moran J. L., Rooney W. L. Effect of cytoplasm on the agronomic performance of grain sorghum hybrids. Crop Science. 2003;43(3):777–781. DOI: https://doi.org/10.2135/cropsci2003.0777

13. Zhao W., Liu Y., Zhou K., Li K., Shen J. How sorghum grain composition affects the quality of Chinese Baijiu - a comprehensive review. Journal of Food Composition and Analysis. 2024;(134):106512.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106512

14. Bichkova V. V., Elkonin L. A. Study of the effect of the type of sterile cytoplasm on the protein content of grain sorghum lines and hybrids. Scientific support for the sustainable development of the agro-industrial complex in the context of climate aridization: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference (March 24-25, 2022). Saratov: *OOO «Amirit»*, 2022. pp. 28–32. URL: https://kpfu.ru/staff_files/F1289277269/SBORNIK_MATERIALOV_Konferenciya_MART_2022_FGBNU_RosNIISK_Rossorgo.pdf

15. Bichkova V. V. Elkonin L. A. Study of the effect of the type of sterile cytoplasm on the starch content of grain sorghum lines and hybrids. Scientific support for the sustainable development of the agro-industrial complex in the context of climate aridization: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference (March 24-25, 2022). Saratov: *OOO «Amirit»*, 2022. pp. 23–27. URL: https://kpfu.ru/staff_files/F1289277269/SBORNIK_MATERIALOV_Konferenciya_MART_2022_FGBNU_RosNIISK_Rossorgo.pdf

16. Kovtunov V. V., Kovtunova N. A., Kravchenko N. S. Antioxidant properties of sorghum grains. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2019;33(6):37–39. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10609

17. Kurniawan H., Dwiatmini K. Tannin content diversity in sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.) germplasm. International conference on organic and applied chemistry (ICOAC) 2022. AIP Conference Proceedings. 2024;2957(1):060005. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0183913

18. Sedghi M., Golian A., Soleimani-Roodi P., Ahmadi A., Aami-Azghadi M. Relationship between color and tannin content in sorghum grain: application of image analysis and artificial neural network. Revista Brasileira de Ciência Avícola. 2012;14(1):57–62. DOI: https://doi.org/10.1590/S1516-635X2012000100010

19. Bychkova V. V., Kibalnik O. P., Sazonova I. A., Kameneva O. B. Influence of meteorological conditions of the year on the biochemical composition of sorghum grain. *Agrarnaya nauka* = Agrarian science. 2023;(12):102–107. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-377-12-102-107

20. Kibalnik O. P., Bichkova V. V., Yerokhina A. V. Use of correlation analysis in grain sorghum selection for arid regions. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University. 2024;(3(77)):36–44. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24411/2078-1318-2024-3-36-44

Вклад авторов: Бычкова В. В. – концепция и план исследования, анализ данных, подготовка рукописи; Кибальник О. П. – анализ данных, подготовка рукописи; Сазонова И. А. – концепция и план исследования, анализ данных.

Сведения об авторах

✉ **Бычкова Вера Валерьевна,** кандидат биол. наук, ведущий научный сотрудник отдела биохимии и биотехнологии, ФГБНУ «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы», 1-й Институтский пр-д, д. 4, г. Саратов, Российская Федерация, 410050, e-mail: rossorgo@yandex.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0288-663X,** e-mail: bychkova_vv@list.ru

Кибальник Оксана Павловна, доктор биол. наук, главный научный сотрудник отдела селекции, ФГБНУ «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы», 1-й Институтский пр-д, д. 4, г. Саратов, Российская Федерация, 410050, e-mail: rossorgo@yandex.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1808-8974**

Сазонова Ирина Александровна, доктор биол. наук, главный научный сотрудник отдела биохимии и биотехнологии, ФГБНУ «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы», 1-й Институтский пр-д, д. 4, г. Саратов, Российская Федерация, 410050, e-mail: rossorgo@yandex.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9844-5339**

Author contributions: Bychkova V. V. – research plan and concept, data analysis, manuscript preparation; Kibalnik O. P. – data analysis, manuscript preparation; Sazonova I. A. – research plan and concept, data analysis.

Information about the authors

✉ **Vera V. Bychkova**, PhD in Biology, leading researcher, the Department of Biochemistry and Biotechnology, Russian Research, Design and Technology Institute of Sorghum and Corn, 1st Institutsky proezd, 4, Saratov, Russian Federation, 410050, e-mail: rossorgo@yandex.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0288-663X,** e-mail: bychkova_vv@list.ru

Oksana P. Kibalnik, DSc in Biology, chief researcher, the Department of Breeding, Russian Research, Design and Technology Institute of Sorghum and Corn, 1st Institutsky proezd, 4, Saratov, Russian Federation, 410050, e-mail: rossorgo@yandex.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1808-8974**

Irina A. Sazonova, DSc in Biology, chief researcher, the Department of Biochemistry and Biotechnology, Russian Research, Design and Technology Institute of Sorghum and Corn, 1st Institutsky proezd, 4, Saratov, Russian Federation, 410050, e-mail: rossorgo@yandex.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9844-5339**

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.340–349
УДК 635.21:631.527:631.523.4

(cc) BY

Результаты корреляционного и путевого анализов для выявления селекционно-ценных признаков картофеля, влияющих на урожайность

© 2026. М. Е. Мухордова✉, А. И. Черемисин, С. В. Согуляк, М. В. Урман
ФГБНУ «Омский аграрный научный центр», г. Омск, Российская Федерация

В статье отражены результаты испытания 12 сортов картофеля в условиях Омской области (2022–2024 гг.). Цель исследований – установить методами корреляционного и путевого анализов взаимосвязи между хозяйственно ценными признаками сортов картофеля для дальнейшего использования результатов в программах селекции на повышенную продуктивность. Погодные условия вегетационных периодов отличались по гидротермическому коэффициенту (ГТК): 2022 г. – благоприятный по теплу и влагообеспеченности (ГТК = 1,02); 2023 г. – засушливый (ГТК = 0,78); 2024 г. – переувлажненный (ГТК = 1,63). Согласно основным показателям урожайности дана характеристика сортов для эффективного использования их потенциала. Выделены сорта: Крепыш (Россия) – с высокой урожайностью (30,8 т/га) и массой товарного клубня (88,3 г); Гала (Германия) и Гранд (Россия) – с наибольшим количеством клубней (11,4 и 10,7 соответственно) при небольшой массе товарного клубня, которые можно использовать для переработки. Корреляционная взаимосвязь установлена между урожайностью и массой товарного клубня в 2022 г. (r = 0,418) и 2023 г. (r = 0,504), а в 2024 г. – между урожайностью и количеством клубней на одном кусте (r = 0,434). Для разработки эффективной программы селекции, используя интеграцию статистических методов (расчет путевых коэффициентов) с селекционной оценкой, определена наибольшая селекционная ценность отдельных количественных признаков растений картофеля, связанных с урожайностью. Обнаружен высокий и положительный прямой эффект на урожайность признаков «масса товарного клубня» (2022-2023 гг.) и «количество стеблей на растении» (во влажный 2024 г.); очень низкий (2022-2023 гг.) – «количество стеблей на растении» и незначимый – «товарность урожая». Признак «масса товарного клубня» может быть использован при отборе исходного материала для селекции картофеля на повышенную продуктивность.

Ключевые слова: *Solanum tuberosum* L., *урожайность, прямой и косвенный эффект, взаимосвязь*

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Омский аграрный научный центр» (тема № FNUN-2023-0010).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Мухордова М. Е., Черемисин А. И., Согуляк С. В., Урман М. В. Результаты корреляционного и путевого анализов для выявления селекционно-ценных признаков картофеля, влияющих на урожайность. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):340–349. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.340-349

Поступила в редакцию: 18.06.2025 Принята к публикации: 27.03.2026
Доработана после рецензирования: 07.10.2025 Опубликована онлайн: 27.04.2026

Results of correlation and path analyses for identifying breeding-valuable traits in potato affecting yield

© 2026. Maria E. Mukhordova✉, Alexander I. Cheremisin, Sergey V. Sogulyak, Maksim V. Urman
Omsk Agrarian Scientific Center, Omsk, Russian Federation

The article presents the results of study of 12 potato cultivars in the Omsk region (2022–2024). The aim of the research was to establish relationships between economically valuable traits of potato cultivars using correlation and path analysis methods for their further use in breeding programs aimed at increasing productivity. The weather conditions during the growing seasons differed in terms of hydrothermal coefficient (HTC): 2022 – favorable in terms of heat and moisture supply (HTC = 1.02); 2023 – dry (HTC = 0.78); 2024 – wet (HTC = 1.63). Based on the main yield parameters, the cultivars were characterized for the effective use of their potential. The following varieties were identified: 'Krepysh' (Russia) – with high yield (30.8 t/ha) and marketable tuber weight (88.3 g); 'Gala' (Germany) and 'Grand' (Russia) – with the highest number of tubers (11.4 and 10.7) with low weight of marketable tuber suitable for processing. Correlation relationship was established between the yield and marketable tuber weight in 2022 (r = 0.418) and 2023 (r = 0.504), and in 2024 – between the yield and the number of tubers per plant (r = 0.434). To develop an effective breeding program, using the integration of statistical methods (calculation of path coefficients) with breeding assessment, the highest breeding value of individual quantitative traits of potato plants was determined. A high positive direct effect on the yield was found for the "marketable tuber weight" trait (2022-2023) and "the number of stems per plant" (in the wet 2024); a very low effect (2022-2023) for the "number of stems per plant" trait and an insignificant effect for the "marketability" trait. The "marketable tuber weight" trait can be used in the selection of source material for potato breeding for increased productivity.

Keywords: *Solanum tuberosum* L., *yield, direct and indirect effect, relationship*

Acknowledgements: the research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Omsk Agrarian Scientific Center (theme No. FNUN-2023-0010).

The authors thank the reviewers for their contribution to the expert assessment of the work.

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

For citations: Mukhordova M. E., Cheremisin A. I., Sogulyak S. V., Urman M. V. Results of correlation and path analyses to identify breeding-valuable traits in potato affecting yield. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):340–349. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.340-349

Received: 18.06.2025 Accepted for publication: 27.03.2026
Revised: 07.10.2025 Published online: 27.04.2026

Картофель (*Solanum tuberosum* L.) является одной из важнейших незерновых культур, обладающей высокой питательной и экономической ценностью, и играет решающую роль в обеспечении глобальной продовольственной безопасности страны [1]. Благодаря высокой адаптивности к различным агроклиматическим условиям, картофель культивируется в более чем 100 странах мира, занимая четвертое место по объему производства после кукурузы, пшеницы и риса [2].

Высокий потенциал урожайности картофеля и его питательная ценность ставят эту культуру в центр внимания сельскохозяйственных производителей во всем мире [3, 4]. Производство и потребление картофеля в развивающихся странах неуклонно растет, в то время как в развитых странах, несмотря на тенденцию к снижению, он по-прежнему является важным элементом рациона человека [5, 6].

Однако средняя мировая урожайность, по данным ФАО[1], составляет чуть более 20 т/га, что не всегда объясняется почвенными условиями. Все чаще появляются мнения, согласно которым потенциал урожайности этой культуры не реализуется в полной мере из-за изменения климата[2]. Частые экстремальные погодные явления, такие как засухи, аномальные осадки и повышение температур, негативно влияют на рост, развитие и продуктивность картофеля [7]. В связи с этим актуальным направлением исследований становится поиск устойчивых и высокопродуктивных генотипов, способных адаптироваться к неблагоприятным условиям окружающей среды.

Урожайность – сложный показатель, имеющий несколько важных аспектов. Понимание характера взаимосвязи урожайности с другими количественными признаками является основой для обоснованного отбора селекционного материала, так как позволяет целенаправленно выбирать сопутствующие показатели, напрямую влияющие на итоговую продуктивность [8].

Успех любой селекционной программы по повышению продуктивности зависит от степени генетической изменчивости, присутствующей в популяции. Корреляционные исследования позволяют установить величину связи урожайности с ее компонентами, анализ коэффициента пути дает возможность провести тщательную оценку конкретного признака, который создает данную ассоциацию [9]. Кроме того, облегчает оценку степени взаимосвязи между урожайностью и характерными для нее признаками и позволяет критически анализировать [10].

Путевой анализ направлен на разложение корреляции между зависимой переменной и каждой независимой переменной на прямой эффект одного признака и косвенные эффекты других факторов из набора данных. Путевые коэффициенты могут иметь как положительные, так и отрицательные значения и, в отличие от коэффициентов корреляции, по абсолютной величине могут превышать единицу [11]. Путевой анализ помогает выявить факторы, оказывающие прямое влияние, а сопоставление его результатов с данными корреляционного анализа позволяет классифицировать их на «активные» факторы, влияние которых подтверждается значимыми путевыми и корреляционными коэффициентами, и «потенциальные», для которых прямое воздействие скрыто множеством других факторов [12].

Таким образом, в настоящее время в селекции исследуются комплексы признаков и предлагаются пути реализации эффективных программ селекции с использованием не только парных коэффициентов корреляции, но и путевых коэффициентов для нахождения прямых и косвенных эффектов взаимосвязанных признаков [13].

Цель исследований – установить методами статистического анализа взаимосвязи между хозяйственно ценными признаками сортов картофеля для дальнейшего использования результатов в программах селекции на повышенную продуктивность.

[1]FAO. FAO Publications Catalogue. Rome. 2022.
URL: https://openknowledge.fao.org/items/4e016512-9c58-411d-a8c4-ee282294a52a

[2]Мартынова К. В. Совершенствование приемов возделывания новых сортов картофеля на продовольственные и семенные цели в условиях Нечерноземной зоны: дис. … канд. с.-х. наук. Брянск, 2022. 164 с.

Научная новизна – с помощью интеграции статистических методов с селекционной оценкой определены парные коэффициенты корреляций и путевые коэффициенты признаков сортов картофеля, на их основе установлен вклад каждого из них в урожайность. Выделены и рекомендованы сорта, обладающие наилучшей урожайностью и морфометрическими показателями, выявлена ценность их признаков.

Материал и методы. Материалом для исследования служили 16 сортов картофеля, представленных в таблице 1.

Таблица 1 – **Экспериментальный материал картофеля, использованный в исследованиях** /
Table 1 – **Experimental potato material used in the studies**

Сорт / Cultivar	*Родословная / Pedigree*	*Учреждение-оригинатор, страна / Institution-originator, country*
Крепыш / ‘Krepysh’	Шурминский-2 х 2953-34 / ‘Shurminskij-2’ x 2953-34	ФГБНУ "Федеральный исследовательский центр картофеля имени А. Г. Лорха", Россия, Московская обл. / Russian Potato Research Center, Moscow region, Russia
Фаворит/ ‘Favorit’	Романце х Удача / ‘Romance’ x ‘Udacha’	ФГБНУ "Федеральный исследовательский центр картофеля имени А. Г. Лорха"; МакКейн Агрикультура (Рус), Россия, Московская обл. / Russian Potato Research Center; McCain Agriculture (Rus), Moscow region, Russia
Алена / ‘Alena’	(Седов х Камераз) х Зарево / (‘Sedov’ x ‘Kameraz’) x ‘Zarevo’	ФГБНУ "Омский аграрный научный центр" Россия, Омск / Omsk Agrarian Scientific Center, Omsk, Russia
Мада / ‘Mada’	-	"Агрофирма КРиММ" Россия, Тюменская обл. / Agrofirma KRiMM, Tyumen region, Russia
Прайм / ‘Prajm’	05-15-40 x ‘Gala’	"Дока-Генные Технологии", Россия, Московская обл. / Doka-Gene Technologies, Moscow region, Russia
Кармен / ‘Karmen’	0-8-10 x ‘Romance’	"Дока-Генные Технологии", Россия, Московская обл. / Doka-Gene Technologies, Moscow region, Russia
Женечка / ‘Zhenechka’	-	"Агрофирма Седек"; Россия, Московская обл. / Agrofirma Sedek, Moscow region, Russia
Сокур / ‘Sokur’	Адретта х Симфония / ‘Adretta’ x ‘Simfoniya’	ФГБНУ "Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук" (СФНЦА РАН), Россия, Новосибирская обл. / Siberian Federal Research Centre of Agro-BioTechnologies of the Russian Academy of Sciences (SFSCA RAS), Novosibirsk region, Russia
Иртыш / ‘Irtysh’	-	ФГБНУ "Омский аграрный научный центр", Россия, Омск / Omsk Agrarian Scientific Center, Omsk, Russia
Гранд / ‘Grand’	Ароза х Наяда / ‘Aroza’ x ‘Nayada’	ФГБНУ "Федеральный исследовательский центр картофеля имени А. Г. Лорха"; Агроцентр "Коренево", Россия, Московская обл. / Russian Potato Research Center; Agrocentre Korenevo, Moscow region, Russia
Триумф / ‘Triumf’	Невский х Гранат / ‘Nevskij’ x ‘Granat’	ООО "Агрофирма Седек"; ФГБНУ "Омский аграрный научный центр" Россия, Москва, Омск / Agrofirma Sedek, Moscow region, Russia; Omsk Agrarian Scientific Center, Omsk, Russia
Жуковский Ранний / ‘Zhukovskij Rannij’	Ягодка х Гидра / ‘Yagodka’ x ‘Gidra’	ФГБНУ "Федеральный исследовательский центр картофеля имени А. Г. Лорха", Россия, Московская обл. / Russian Potato Research Center, Moscow region, Russia
Ариэль / ‘Ariel’	Никулинский х BR 63-67/69 / ‘Nikulinskij’ x BR 63-67/69’	ФГБНУ "Федеральный исследовательский центр картофеля имени А. Г. Лорха"; Агроцентр "Коренево", Россия, Московская обл. / Russian Potato Research Center; Agrocentre Korenevo, Moscow region, Russia
Розара / ‘Rozara’	SECURA x ESH 2605/77	Saka Pflanzenzucht GbR, Германия / SaKa Pflanzenzucht GbR, Germany
Ред Скарлет / ‘Red Skarlet’	ZPC 80-239 x IMPALA	HZPC Holland B. V., Нидерланды / HZPC Holland B. V., Netherlands
Гала / ‘Gala’	2.6 720-86 x LEYLA	Norika Nordring-Kartoffelzucht-und Vermehrungs-GmbH, Германия / Norika Nordring-Kartoffelzucht-und Vermehrungs-GmbH, Germany

Полевые испытания проводили в 2022–2024 гг. на опытном участке ФГБНУ «Омский АНЦ» в условиях орошения. Почва лугово-черноземная среднемощная среднегумусная тяжелосуглинистая: реакция среды нейтральная, содержание гумуса 6,0–6,5 % (по методу Тюрина),

средняя обеспеченность подвижным фосфором – менее 200 мг/кг, высокая – обменным калием – 150–200 мг/кг (по методу Чирикова). Перед посадкой картофеля содержание нитратного азота в слое почвы 0–20 см (по методу Грандваль-Ляжу) составляло 30 мг/кг, подвижного фосфора – 147 мг/кг.

Предшественник – яровая пшеница. Технология выращивания картофеля – принятая для зоны: зяблевая вспашка; ранневесеннее боронование; предпосадочная обработка фрезерным культиватором. Перед фрезерованием вносили аммиачную селитру – 120 кг/га в физическом весе.

Посадку проводили 17–22 мая 4-рядной клоновой сажалкой в трехкратной повторности. Площадь питания одного растения – 75×30 см, на делянке размещали по 20 растений.

После посадки проведено гребнеобразование. Для борьбы с сорняками использовали 3-кратную обработку гербицидами: Хилер, 1 л/га; Лазурит, 0,8 кг/га; Кассиус, 0,05 л/га. Против колорадского жука выполнили две обработки инсектицидами Кинфос, 0,15 л/га и Децис Профи, 0,12 кг/га. Для профилактики грибных болезней применяли фунгициды Ширлан, 1 л/га; Консенто, 1 л/га. За 10 дней до скашивания ботвы посадки обработали препаратом Реглон в дозе 2 л/га. Для уборки коллекционного питомника использовали двухрядную копалку, для остальных – однорядный копатель с последующим ручным подбором. Урожайность и ее структуру учитывали при уборке путем взвешивания.

Наблюдения и учёты проводили в соответствии с методическими рекомендациями[3, 4].

Полученные данные обрабатывали методами дисперсионного и корреляционного анализов в соответствии с классической методикой Б. А. Доспехова[5] с применением Microsoft Excel 2007. Для генетико-статистической интерпретации результатов дополнительно выполнили расчёт коэффициентов путей по алгоритму А. И. Седловского с соавт.[6] с использованием специализированного ПО AGROS 2.13.

Погода вегетационного периода 2022 г. в целом была умеренно влажной (ГТК = 1,02). Май выдался жарким и засушливым, в июне наблюдался дефицит осадков в первые две декады при относительно высоких температурах. Июль был теплым с обильными дождями в конце месяца: средняя температура (+20,5 °С) превысила норму на 1,0 °С. Август также сложился теплее обычного (+17,5 °С; +1,4 °С к норме), но с резким недостатком осадков (2,4 мм при норме 54 мм).

В 2023 г. весной отмечены резкие суточные колебания температуры (от -7,3 до +28,9 °С). Июль был аномально жарким (+21,2 °С; +3,2 °С выше нормы), с низкой влажностью (до 18 %) и суховеями. Несмотря на осадки в пределах многолетних значений (65 мм), засуха в начале июля (ГТК = 0,78) негативно повлияла на формирование клубней картофеля.

Характеризуя метеоусловия первой половины 2024 г., можно отметить повышение температуры воздуха, июнь был теплее обычного (+20,0 °С; +2,3 °С к норме) с небольшим дефицитом осадков (44,9 мм при норме 54 мм). В июле температура оставалась близкой к норме (+19,8 °С), но выпало рекордное количество осадков (166,7 мм против средних 59 мм). В августе зафиксирована температура чуть прохладнее многолетних значений (-1,0 °С), осадки составили 80,9 % от нормы (43,7 мм). В целом, по итогу летнего периода отмечено переувлажнение (ГТК = 1,63). Погодные условия в годы исследований значительно различались, такая вариабельность позволила провести комплексный анализ влияния метеофакторов на изучаемые показатели.

Результаты и их обсуждение. Исследуемые нами хозяйственно ценные признаки картофеля относятся к категории количественных. Их выраженность во многом определяется условиями внешней среды.

Анализируя данные таблицы 2 по основным показателям продуктивности разных сортов картофеля за 2022–2024 гг., можно отметить, что самая высокая урожайность у сортов Крепыш – 30,8 т/га, Женечка – 30,0 т/га и Иртыш – 29,0 т/га. Среднее значение урожайности составило 26,7 т/га. Самая низкая урожайность получена у сорта Гранд – 24,6 т/га и Прайм – 24,4 т/га.

[3]Симаков Е. А., Анисимов Б. В., Шабанов А. Э., Зебрин С. Н., Юрлова С. М., Овэс Е. В. и др. Методические положения по проведению оценки сортов картофеля на испытательных (тестовых) участках. М.: ВНИИКХ, 2013. 15 с.

[4]Банадысев С. А., Старовойтов А. М., Колядко И. И., Маханько В. Л., Фандо В. В., Козлова Л. И. и др. Методические рекомендации по специализированной оценке сортов картофеля. Минск, 2003. 70 с. URL: https://elib.cnshb.ru/books/free/0409/409270/4/

[5]Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с. URL: https://studfile.net/preview/5051840/

[6]Седловский А. И., Мартынов С. П., Мамонов Л. К. Генетико-статистические подходы к теории селекции самоопыляющихся культур. Алма-Ата: Наука, 1982. 200 с.

Таблица 2 – **Основные показатели продуктивности сортов картофеля (в среднем за 2022–2024 гг.) /**
Table 2 – **The main indicators of productivity of potato cultivars (average for 2022–2024)**

Сорт / Cultivar	*Урожайность, т/га / Yield, t/ha*				*Масса товарного клубня, г / Marketable tuber weight, g*	*Количество клубней на одном кусте, шт. / Number of tubers on one bush, pcs.*	*Товарность, % / Marketability, %*	*Количество стеблей на растении, шт. / Number of stems per plant, pcs.*	*Масса ботвы картофеля, г/куст / Potato vine weight, g/bush*
	2022 г.	*2023 г.*	*2024 г.*	*среднее / average*					
Алена / ‘Alena’	23,3	25,3	19,5	22,7	82,0	6,7	90,3	2,6	291,7
Ариэль / ‘Ariel”	24,1	30,0	23,0	25,7	78,0	8,7	91,0	4,2	311,7
Жуковский Ранний / ‘Zhukovskij Rannij’	24,9	33,5	25,0	27,8	85,7	8,4	90,0	3,1	291,7
Крепыш / ‘Krepysh’	32,4	37,0	23,0	30,8	88,3	8,5	92,3	3,4	293,3
Розара / ‘Rozara’	28,3	32,7	24,8	28,6	73,0	9,9	83,3	4,3	340,0
Фаворит / ‘Favorit’	21,7	27,5	24,3	24,5	67,3	8,3	89,0	3,8	316,7
Мада / ‘Mada’	26,0	27,2	22,4	25,2	74,7	8,0	88,3	4,0	400,3
Прайм / ‘Prajm’	26,7	24,5	22,0	24,4	70,7	8,7	88,7	3,7	353,3
Гала / ‘Gala’	29,3	31,0	24,0	28,1	66,0	11,4	80,3	4,4	365,0
Иртыш / ‘Irtysh’	29,6	31,5	25,9	29,0	74,0	9,5	89,3	3,8	355,0
Триумф / ‘Triumf”	24,3	32,0	25,3	27,2	69,0	9,8	89,7	3,8	340,0
Кармен / ‘Karmen’	27,2	28,8	20,8	25,6	62,7	10,3	89,3	4,4	388,3
Женечка / ‘Zhenechka’	31,3	30,2	28,5	30,0	81,0	8,5	90,7	4,2	361,7
Сокур / ‘Sokur’	23,8	29,0	24,3	25,7	75,7	8,3	87,7	4,1	388,0
Ред Скарлет / ‘Red Skarlet’	28,3	28,5	23,0	26,6	73,0	8,9	89,7	4,2	380,7
Гранд / ‘Grand’	24,8	27,0	22,0	24,6	60,3	10,7	87,7	4,2	357,3
Среднее / Average	26,6	29,7	23,6	26,7	73,9	9,0	88,6	3,9	345,9
$НСР_{05}$/ LSD_{05}	2,4	3,0	2,1	-	11,7	1,5	5,7	0,4	36,4

Масса товарного клубня: самые крупные клубни получены у сортов Крепыш (88,3 г) и Жуковский ранний (85,7 г); самые мелкие – у Гранд (60,3 г) и Кармен (62,7 г). Средний вес клубня составил 73,9 г.

Количество клубней на одном кусте: наибольшее количество выявлено у сортов Гала (11,4 шт.) и Гранд (10,7 шт.); минимальное значение данного показателя зафиксировано у сорта Алена (6,7 шт.). Среднее количество составило 9,0 клубней.

Товарность: лучшие показатели определены у сортов Крепыш (92,3 %) и Ариэль (91,0 %). Самая низкая товарность у сортов Гала (80,3 %) и Розара (83,3 %). Среднее значение данного показателя составило 88,6 %.

Количество стеблей на растении: максимальное количество стеблей отмечено у Галы и Кармен – по 4,4 шт.; минимальное у Алены – 2,6 шт.; в среднем – 3,9 стебля.

Масса ботвы картофеля (г/куст): наибольшая зарегистрирована у сортов Мада (400,3 г), Кармен (388,3 г) и Сокур (388,0 г), меньшая – у сортов с высокой урожайностью – Крепыш (293,3 г). Средняя масса ботвы – 345,9 г.

Таким образом, сорт Крепыш выделяется максимальной урожайностью (30,8 т/га), крупными клубнями, высокой товарностью и средней массой ботвы, что делает его перспективным для выращивания с точки зрения урожайности. Гала и Гранд имеют большое количество клубней, но вес клубней и товарность ниже среднего. Сорта с повышенной массой ботвы (Мада, Кармен) не всегда показывают высокую урожайность, возможно, растения тратят больше ресурсов на вегетативную массу.

Средние показатели по всем сортам дают хороший ориентир для оценки потенциальной продуктивности: урожайность составила около 27 т/га; товарность – 89 %; средняя масса товарного клубня – около 74 г.

Анализ корреляционных взаимосвязей признаков продуктивности картофеля представлен в таблице 3.

Таблица 3 – **Матрица коэффициентов корреляции между хозяйственно ценными признаками картофеля (2022–2024 гг.) /**
Table 3 – **Matrix of correlation coefficients between economically valuable potato traits (2022–2024)**

Признак / Trait	*Урожайность / Yield*	*МТК / MTW*	*ККК / NTB*	*Т / М*	*КСР / NSP*	*МБК / PVW*
2022 г.						
Урожайность / Yield	-	0,418	0,419	-0,297	0,380	-0,189
МТК / MTW	-	-	-0,553*	0,463	-0,044	-0,234
ККК / NTB	-	-	-	-0,645*	0,278	-0,118
Т/ М	-	-	-	-	-0,295	-0,192
КСР / NSP	-	-	-	-	-	0,542*
МБК / PVW	-	-	-	-	-	-
2023 г.						
Урожайность / Yield	-	0,504*	0,123	0,502*	-0,132	-0,278
МТК / MTW	-	-	-0,765*	0,817*	-0,579*	-0,576*
ККК / NTB	-	-	-	-0,562*	0,616*	0,464
Т/ М	-	-	-	-	-0,497*	-0,684*
КСР / NSP	-	-	-	-	-	0,761*
МБК / PVW	-	-	-	-	-	-
2024 г.						
Урожайность / Yield	-	0,067	0,434	0,287	0,318	0,209
МТК / MTW	-	-	-0,683	0,458	-0,844	-0,347
ККК / NTB	-	-	-	-0,180	0,838	0,338
Т/ М	-	-	-	-	-0,416	-0,153
КСР / NSP	-	-	-	-	-	0,590
МБК / PVW	-	-	-	-	-	-

Примечания: * при 5%-м уровне значимости $r = 0,497$, n = 16; МТК – масса товарного клубня, г; ККК – количество клубней на одном кусте, шт.; Т – товарность, %; КСР – количество стеблей на растении, шт.; МБК – масса ботвы картофеля, г/куст /
Notes: * at 5% significance level r = 0.497, n = 16; MTW – Marketable tuber weight, g; NTB – Number tubers one bush, pcs.; M – Marketability, %; NSP – number of tubers per plant, pcs.; PVW – Potato Vine weight, g/bush

В 2022 и 2023 гг. урожайность положительно связана с показателем «масса товарного клубня», причем в 2023 г. эта связь статистически значима. В 2024 г. сопряженность этого признака с урожайностью ослабла и стала недостоверной. Между признаками «масса товарного клубня» и «количество клубней на одном кусте» наблюдается стабильная значимая отрицательная взаимосвязь (особенно в 2022 и 2023 гг.). Данный показатель положительно коррелирует и с товарностью урожая, но имеет отрицательно направленную взаимосвязь с количеством стеблей на растении и массой ботвы. Между показателями «количество стеблей на растении» и «масса ботвы» стабильная значимая положительная связь во все годы эксперимента. В 2023 г. товарность урожая отрицательно коррелирует с количеством стеблей на растении и массой ботвы, поскольку интенсивное развитие вегетативной массы не всегда полезно для урожая. Важно найти оптимальный баланс между вегетативной и продуктивной частью растения. В 2024 г. отмечено ослабление многих взаимосвязей, кроме относительно высокой отрицательной корреляции между признаками «масса товарного клубня» и «количество стеблей на растении», а также относительно высокой положительной – между «количество клубней на одном кусте» и «количество стеблей на растении».

Путевой анализ позволяет понять структуру взаимосвязей между изучаемыми признаками и оценить относительную значимость (прямой и косвенный эффект) каждого (табл. 4).

Таблица 4 – **Матрица путевых коэффициентов между хозяйственно ценными признаками картофеля (2022–2024 гг.) /**
Table 4 – **Matrix of path coefficients between economically valuable potato traits (2022–2024)**

Признак / Trait	*Путевые коэффициенты / Path coefficients*					*Коэффициент корреляции с урожайностью / Correlation coefficient with yield*
	МТК / MTW	*ККК / NTB*	*Т / М*	*КСР / NSP*	*МБК / PVW*	
2022 г.						
МТК / MTW	**0,948**	-0,435	-0,085	-0,006	-0,003	0,418
ККК / NTB	-0,524	**0,787**	0,119	0,039	-0,002	0,419
Т/ М	0,439	-0,507	**-0,184**	-0,042	-0,003	-0,297
КСР / NSP	-0,042	0,219	0,054	**0,141**	0,007	0,380
МБК / PVW	-0,222	-0,093	0,035	0,077	0,014	-0,189
2023 г.						
МТК / MTW	**1,379**	-0,978	0,066	0,086	-0,054	0,504*
ККК / NTB	-1,055	**1,270**	-0,045	-0,091	0,044	0,123
Т/ М	1,126	-0,714	**0,080**	0,0737	-0,065	0,502*
КСР / NSP	-0,798	0,783	-0,040	**-0,148**	0,072	-0,132
МБК / PVW	-0,794	0,589	-0,055	-0,113	0,095	-0,278
2024 г.						
МТК / MTW	**1,154**	-0,090	0,165	-1,250	0,088	0,067
ККК / NTB	-0,789	**0,132**	-0,065	1,242	-0,086	0,434
Т/ М	0,529	-0,024	**0,359**	-0,616	0,039	0,287
КСР / NSP	-0,974	0,110	-0,149	**1,482**	-0,150	0,318
МБК / PVW	-0,400	0,044	-0,055	0,874	-0,254	0,209

Примечания: * при 5%-м уровне значимости; обозначение признаков см. в табл. 2; жирным шрифтом выделены путевые коэффициенты, характеризующие прямые эффекты; остаточное P_0 – 0,410 (2022 г.), 0,339 (2023 г.), 0,587 (2024 г.)

Notes: * at a 5% significance level; for the designation of the traits, see Table 2; path coefficients characterizing direct effects are shown in bold; residual P_0 – 0.410 (2022), 0.339 (2023), 0.587 (2024)

В 2022 и 2023 гг. признак «масса товарного клубня» проявлял наибольший прямой эффект (0,948 и 1,379 соответственно), его косвенный эффект положителен в связи урожайности с товарностью урожая и отрицателен в связях с количеством клубней на одном кусте, количеством стеблей на растении и массой ботвы. В 2024 г. максимальный прямой эффект был достигнут в связях между количеством стеблей на растении (1,482), косвенный эффект

положителен в связи с количеством клубней на одном кусте и массой ботвы (1,242 и 0,874), в то же время отрицательный эффект отмечен с товарностью урожая. Достаточно высокий прямой эффект признака «масса товарного клубня» (1,154) в сочетании с отрицательными вкладами количества клубней и стеблей на растении (-0,789 и -0,974) выразился в незначимой корреляции между массой товарного клубня и урожайностью. Исследования ученых из Индии (г. Солан) подтвердили наши результаты, что прямой эффект массы товарного клубня имеет положительную взаимосвязь с урожайностью [14]. Эксперименты ученых Эфиопии и Индии (г. Райпур) показали результаты противоположные нашим, а именно, прямой эффект признака «товарность» имел положительную корреляцию с урожайностью [9, 10]. Во всех этих работах признак «количество стеблей на растении» имел положительную сопряженность с урожайностью, что согласуется с нашими исследованиями.

Во взаимосвязях всех компонентов с урожайностью независимо от года исследования проявились противоречия между эффектами признаков «масса товарного клубня» и «количество клубней на одном кусте», исключение составил 2022 г., где данные показатели были незначимы.

Полученные результаты указывают на селекционную важность признака «масса товарного клубня», который внес наибольший вклад в формирование урожайности картофеля в годы исследований.

Заключение. Для максимально эффективного использования потенциала сорта важно учитывать не только урожайность, но и морфометрические показатели. Наблюдения за показателями продуктивности сортов картофеля в условиях Омской области в период 2022–2024 гг. позволили выделить следующие сорта: Крепыш – по высокой урожайности (30,8 т/га) и массе товарного клубня (88,3 г); Гала и Гранд – по наибольшему количеству клубней (11,4 и 10,7) небольшого размера (можно использовать для переработки в условиях, где важен объём, а не размер).

Отмечено значительное варьирование коэффициентов корреляции между хозяйственно ценными признаками по годам исследований. Самая высокая взаимосвязь обнаружена между урожайностью и массой товарного клубня в 2022 и 2023 гг. (в 2024 г. – между урожайностью и количеством клубней на одном кусте).

При анализе взаимосвязей между хозяйственно ценными признаками сортов картофеля с использованием путевого анализа продуктивности определена наибольшая селекционная ценность отдельных количественных признаков растений картофеля. Прямой эффект каждого отдельного признака на продуктивность может быть высоким и положительным во все годы (масса товарного клубня) или в отдельный влажный по погодным условиям 2024 г. (количество стеблей на растении), очень низким в 2022 и 2023 гг. (количество стеблей на растении) или незначимым (товарность). Признак «масса товарного клубня» во все три года исследований показал высокий прямой эффект влияния на урожайность, подтвержденный положительной парной корреляцией в 2022 и 2023 гг. Данный признак может быть использован при отборе исходного материала для селекции картофеля на повышенную продуктивность.

Список литературы

1. Мухордова М. Е., Черемисин А. И., Согуляк С. В., Урман М. В. Комплексный подход к анализу перспективного селекционного материала картофеля в условиях Омской области. Овощи России. 2025;(2):20–29. DOI: https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-2-20-29 EDN: RDUFME

2. Анцуто Т. С., Хох Н. А. Адаптивный потенциал сортов картофеля белорусской и зарубежной селекции в условиях западного региона Республики Беларусь. Картофелеводство: сб. научн. тр. Минск, 2020. Т. 27. С. 5–10. Режим доступа: https://belbulba.by/wp-content/uploads/2020/09/Tom-27.pdf

3. Жевора С. В., Казаков О. Г., Мелешин А. А., Дуданов И. И. Генетическая коллекция картофеля федерального исследовательского центра имени А. Г. Лорха. Научные труды по агрономии. 2022;(1):10–15. DOI: https://doi.org/10.35244/2658-7963-2022-7-1-10-15 EDN: GQJOXI

4. Мухордова М. Е., Черемисин А. И., Урман М. В. Комплексная оценка перспективного селекционного материала картофеля в условиях Омской области. Кормопроизводство. 2023;(3):12–17. DOI: https://doi.org/10.25685/krm.2023.97.17.002 EDN: TAIOLP

5. Potarzycki J., Wendel J. The Effect of Sulfur Carriers on Nitrogen Use Efficiency in Potatoes – A Case Study. Agronomy. 2023;13(10):2470. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy13102470

6. Ye Y., Jin L., Bian C., Liu J., Guo H. Monitoring and Optimization of Potato Growth Dynamics under Different Nitrogen Forms and Rates Using UAV RGB Imagery. Agronomy. 2024;14(10):2257. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy14102257

7. Красников С. Н., Черемисин А. И., Согуляк С. В., Красникова О. В. Создание нового исходного материала для селекции картофеля в условиях Омской области. Картофель и овощи. 2025;(1):43–46. DOI: https://doi.org/10.25630/PAV.2025.67.94.006 EDN: PQJRFT

8. Шанина Е. П., Клюкина Е. М., Стафеева М. А., Беляева Н. В., Гончар О. Н. Сравнительный анализ сортов картофеля коллекционного питомника в зависимости от географического происхождения. Достижения науки и техники АПК. 2020;34(6):75–78. DOI: https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10614 EDN: FYDLHG

9. Hunde N. F., Galalcha D. T., Limeneh D. F. Correlation and path coefficient analyses of tuber yield and yield components among potato *(Solanum tuberosum L.)* genotypes at Bekoji, southeastern Ethiopia. International Journal of Agricultural Research Innovation and Technology. 2022;12(2):144–154. DOI: https://doi.org/10.3329/ijarit.v12i2.64102

10. Sahu P., Chaurasiya P. C., Rangare N. R., Kumar V., Kumar S. V., Singh T. et al. Study on genetic variability, correlation and path analysis in F1 potato genotypes *(Solanum tuberosum L.)*. The Pharma Innovation Journal. 2023;12(7):1336–1339. URL: https://www.researchgate.net/publication/375671426_Study_on_genetic_variability_correlation_and_path_analysis_in_F_1_potato_genotypes_Solanum_tuberosum_L

11. Osaru F., Karungi J., Odama R., Chelangat D. M., Musana P., Otema M. A. et al. Identification of the key morphological sweetpotato weevil resistance predictors in Ugandan sweetpotato genotypes using correlation and path-coefficient analysis. Crop Science. 2023;63(3):1126–1138. DOI: https://doi.org/10.1002/csc2.20915

12. Иванов Д. А. Применение геостатистических методов при разработке ландшафтно-адаптивного землепользования. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2019;20(4):351–367. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.4.351-367 EDN: DNESSC

13. Gebreselassie H., Ajema L. G. Correlation, Path Coefficient and Multivariate Analysis for Yield and Yield-associated Traits among Potato (*Solanum tuberosum L.*) Genotypes Grown in Eastern Ethiopia. New Zealand Journal of Agricultural Research. 2022;8(2):7. DOI: https://doi.org/10.33552/WJASS.2022.08.000684

14. Singh J., Kumar D., Sood S., Bhardwaj V., Kumar R. Kumar S. Genetic variability and association studies for yield and its attributes in cultivated potato (*Solanum tuberosum L.*). Vegetable Science. 2024;51(1):148–153. DOI: https://doi.org/10.61180/vegsci.2024.v51.i1.20

References

1. Mukhordova M. E., Cheremisin A. I., Sogulyak S. V., Urman M. V. An integrated approach to the analysis of promising potato breeding material in the conditions of the Omsk region. *Ovoshchi Rossii* = Vegetable crops of Russia. 2025;(2):20–29. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-2-20-29

2. Antsuto T. S., Khokh N. A. Adaptive potential of potatoes varieties of belarusian and foreign breeding in the conditions of western region of the Republic of Belarus. Potato Growing: collection of scientific works. Minsk, 2020. Vol. 27. pp. 5–10. URL: https://belbulba.by/wp-content/uploads/2020/09/Tom-27.pdf

3. Zhevora S. V., Kazakov O. G., Meleshin A. A., Dudanov I. I. Genetic collection of federal Potato Research Centre. *Nauchniye trudi po agronomii* = Research papers on agronomy. 2022;(1):10–15. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.35244/2658-7963-2022-7-1-10-15

4. Mukhordova M. E., Cheremisin A. I., Urman M. V. The evaluation of promising potato genotypes in the Omsk region. *Kormoproizvodstvo* = Forage Production. 2023;(3):12–17. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.25685/krm.2023.97.17.002

5. Potarzycki J., Wendel J. The Effect of Sulfur Carriers on Nitrogen Use Efficiency in Potatoes – A Case Study. Agronomy. 2023;13(10):2470. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy13102470

6. Ye Y., Jin L., Bian C., Liu J., Guo H. Monitoring and Optimization of Potato Growth Dynamics under Different Nitrogen Forms and Rates Using UAV RGB Imagery. Agronomy. 2024;14(10):2257. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy14102257

7. Krasnikov S. N., Cheremisin A. I., Sogulyak S. V., Krasnikova O. V. Creation of new source material for potato breeding in the conditions of the Omsk region. *Kartofel i ovoshchi* = Potato and Vegetables. 2025;(1):43–46. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.25630/PAV.2025.67.94.006

8. Shanina E. P., Klyukina E. M., Stafeeva M. A., Belyaeva N. V., Gonchar O. N. The comparative geographical analysis of potato varieties from a collection nursery. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2020;34(6):75–78. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10614

9. Hunde N. F., Galalcha D. T., Limeneh D. F. Correlation and path coefficient analyses of tuber yield and yield components among potato *(Solanum tuberosum L.)* genotypes at Bekoji, southeastern Ethiopia. International Journal of Agricultural Research Innovation and Technology. 2022;12(2):144–154. DOI: https://doi.org/10.3329/ijarit.v12i2.64102

10. Sahu P., Chaurasiya P. C., Rangare N. R., Kumar V., Kumar S. V., Singh T. et al. Study on genetic variability, correlation and path analysis in F1 potato genotypes *(Solanum tuberosum L.)*. The Pharma Innovation Journal. 2023;12(7):1336–1339. URL: https://www.researchgate.net/publication/375671426_Study_on_genetic_variability_correlation_and_path_analysis_in_F_1_potato_genotypes_Solanum_tuberosum_L

11. Osaru F., Karungi J., Odama R., Chelangat D. M., Musana P., Otema M. A. et al. Identification of the key morphological sweetpotato weevil resistance predictors in Ugandan sweetpotato genotypes using correlation and path-coefficient analysis. Crop Science. 2023;63(3):1126–1138. DOI: https://doi.org/10.1002/csc2.20915

12. Ivanov D. A. Application of geostatistical methods in the development of landscape-adaptive land use. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2019;20(4):351–367. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.4.351-367

13. Gebreselassie H., Ajema L. G. Correlation, Path Coefficient and Multivariate Analysis for Yield and Yield-associated Traits among Potato (*Solanum tuberosum L.*) Genotypes Grown in Eastern Ethiopia. New Zealand Journal of Agricultural Research. 2022;8(2):7. DOI: https://doi.org/10.33552/WJASS.2022.08.000684

14. Singh J., Kumar D., Sood S., Bhardwaj V., Kumar R. Kumar S. Genetic variability and association studies for yield and its attributes in cultivated potato (*Solanum tuberosum L.*). Vegetable Science. 2024;51(1):148–153. DOI: https://doi.org/10.61180/vegsci.2024.v51.i1.20

Вклад авторов: Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Сведения об авторах

✉ **Мухордова Мария Евгеньевна,** кандидат с.-х. наук, доцент, заведующая лабораторией молекулярно-генетических исследований, ФГБНУ «Омский аграрный научный центр», пр-т Королева, 26, г. Омск, Омская область, Российская Федерация, 644012, e-mail: 55asc@bk.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5788-2409**, e-mail: mukhordova@anc55.ru

Черемисин Александр Иванович, кандидат с.-х. наук, заведующий отделом картофеля, ФГБНУ «Омский аграрный научный центр», пр-т Королева, 26, г. Омск, Омская область, Российская Федерация, 644012, e-mail: 55asc@bk.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8070-0661**

Согуляк Сергей Владимирович, кандидат с.-х. наук, ведущий сотрудник отдела картофеля, ФГБНУ «Омский аграрный научный центр», пр-т Королева, 26, г. Омск, Омская область, Российская Федерация, 644012, e-mail: 55asc@bk.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2593-3064**

Урман Максим Владимирович, младший научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических исследований, ФГБНУ «Омский аграрный научный центр», пр-т Королева, 26, г. Омск, Омская область, Российская Федерация, 644012, e-mail: 55asc@bk.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8430-9172**

Author contributions: All authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Information about the authors

✉ **Maria E. Mukhordova,** PhD in Agricultural Science, associate professor, Head of the Laboratory of Molecular Genetic Research, Omsk Agrarian Scientific Center, 26, Korolev Ave., Omsk, Omsk Region, Russian Federation, 644012, e-mail: 55asc@bk.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5788-2409**, e-mail: mukhordova@anc55.ru

Alexander I. Cheremisin, PhD in Agricultural Science, Head of the Department of Potato, Omsk Agrarian Scientific Center, 26, Korolev Ave., Omsk, Omsk Region, Russian Federation, 644012, e-mail: 55asc@bk.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8070-0661**

Sergey V. Sogulyak, PhD in Agricultural Science, leading researcher, the Department of Potato, Omsk Agrarian Scientific Center, 26, Korolev Ave., Omsk, Omsk Region, Russian Federation, 644012, e-mail: 55asc@bk.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2593-3064**

Maksim V. Urman, junior researcher, the Laboratory of Molecular Genetic Research, Omsk Agrarian Scientific Center, 26, Korolev Ave., Omsk, Omsk Region, Russian Federation, 644012, e-mail: 55asc@bk.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0005-8430-9172**

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.350–358
УДК 631.95:631.524.022

Идентификация и экспериментальное подтверждение кольцевой РНК, ассоциированной с генами деметилаз у кукурузы

© 2026. А. Н. Князев✉, О. В. Разумова, Л. Н. Ефремова, Ю. Н. Смотрова, П. Н. Харченко

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», г. Москва, Российская Федерация

В условиях изменения климата и необходимости снижения пестицидной и агрохимической нагрузки ключевую роль приобретает создание устойчивых сельскохозяйственных культур. Эпигенетические механизмы, такие как модификации гистонов, позволяют растениям адаптироваться к стрессам, не изменяя последовательность ДНК. Особый интерес представляют гистоновые деметилазы – ферменты, активирующие защитные гены. Параллельно с этим кольцевые РНК (circRNA) стали известны как новый класс регуляторных молекул, способных модулировать экспрессию генов. Цель исследования – поиск и валидация circRNA, образующихся из генов гистоновых деметилаз у кукурузы (Zea mays* L.*) на ранних стадиях развития. Исследования проводили на 10-дневных проростках. На основе аннотированных генов и базы данных PlantcircBase 7.0 были отобраны шесть предсказанных circRNA. Для их проверки использовали метод ПЦР с дивергентными праймерами и последующее секвенирование. Экспериментально подтверждено образование только одной кольцевой РНК из шести предсказанных – с локуса гена деметилазы Zm00001d051961. Установлено, что данная circRNA образуется в результате обратного сплайсинга между 2-м и 7-м экзонами, имеет размер 2016 нуклеотидов и демонстрирует тканеспецифическую экспрессию с преобладанием в листьях. Впервые доказано образование circRNA с локуса гена гистоновой деметилазы у кукурузы. Обнаруженная специфичность экспрессии позволяет предположить, что эта молекула участвует в тонкой регуляции активности фермента, потенциально влияя на эпигенетический статус хроматина. Это открытие расширяет понимание механизмов адаптации растений и создает основу для разработки новых стратегий селекции, направленных на повышение устойчивости культур к стрессам.

Ключевые слова: *деметилазы, Zea mays* L.*, мРНК, обратный сплайсинг, агроэкология*

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии» (тема № FGUM -2025-0004).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Князев А. Н., Разумова О. В., Ефремова Л. Н., Смотрова Ю. Н., Харченко П. Н. Идентификация и экспериментальное подтверждение кольцевой РНК, ассоциированной с генами деметилаз у кукурузы. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):350–358. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.350-358

Поступила в редакцию: 31.10.2025 Принята к публикации: 03.04.2026
Доработана после рецензирования: 10.02.2026 Опубликована онлайн: 27.04.2026

Identification and experimental validation of a circular RNA associated with demethylase genes in maize

© 2026. Andrey N. Knyazev✉, Olga V. Razumova, Larisa N. Efremova, Yuliya N. Smotrova, Petr N. Kharchenko

All-Russian Research Institute of Agricultural Biotechnology, Moscow, Russian Federation

In the context of climate change and the need to reduce pesticide and agrochemical use, the development of sustainable crops is becoming increasingly important. Epigenetic mechanisms, such as histone modifications, allow plants to adapt to stress without altering their DNA sequence. Histone demethylases are of particular interest as enzymes that activate defense genes. Concurrently, circular RNAs (circRNAs) have emerged as a new class of regulatory molecules capable of modulating gene expression. The aim of this study was to identify and validate circRNAs derived from histone demethylase genes in maize (Zea mays* L.*) during early developmental stages. The research was conducted on 10-day-old seedlings. Based on annotated genes and the PlantcircBase 7.0 database, six predicted circRNAs were selected. They were validated using PCR with divergent primers and subsequent sequencing. The formation of only one circular RNA out of the six predicted was experimentally confirmed – from the locus of the demethylase gene Zm00001d051961. It has been established that this circRNA is formed through back-splicing between the 2nd and the 7th exons, is 2016 nucleotides in size, and exhibits tissue-specific expression, predominantly in the leaves. This is the first experimental proof of a circRNA originating from a histone demethylase gene locus in maize.

The discovered tissue-specific expression suggests that this circRNA may be involved in the fine-tuning of the demethylase's activity, potentially influencing the epigenetic status of chromatin. This discovery enhances the understanding of plant epigenetic plasticity and lays the groundwork for developing new breeding strategies aimed at enhancing crop stress resilience.

Keywords: *demethylases, Zea mays* L., *mRNA, backsplicing, agroecology*

Acknowledgements: the research was carried out under the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the All-Russian Research Institute of Agricultural Biotechnology (theme No. FGUM-2025-0004).

The authors thank the reviewers for their contribution to the expert assessment of this work.

Conflict of interest: the authors stated that there was no conflict of interest.

For citation: Knyazev A. N., Razumova O. V., Efremova L. N., Smotrova Y. N., Kharchenko P. N. Identification and experimental validation of a circular RNA associated with demethylase genes in maize. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):350–358. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.350-358

Received: 31.10.2025 Accepted for publication: 03.04.2026
Revised: 10.02.2026 Published online: 27.04.2026

Метилирование гистонов играет ключевую эпигенетическую роль в агроэкологии, выступая в качестве молекулярного переключателя, который позволяет растениям адаптироваться к стрессовым факторам окружающей среды. Этот механизм, не меняя первичную последовательность ДНК, регулирует активность генов, ответственных за устойчивость к засухе, засолению почв, патогенам и вредителям. В агроэкологической практике понимание этого процесса открывает пути для выращивания более резистентных культур, способных давать стабильный урожай с минимальным применением химических удобрений и пестицидов. Таким образом, метилирование гистонов лежит в основе «экологической памяти» растений, способствуя развитию устойчивых и самовосстанавливающихся агроэкосистем, что является одной из главных целей современного сельского хозяйства.

Метилирование гистонов является одним из ключевых эпигенетических механизмов, влияющих на рост и развитие растений в различных условиях. Этот процесс включает добавление метильных групп к аминокислотным остаткам в гистонах, что изменяет структуру хроматина и регулирует доступность ДНК для ферментов, участвующих в транскрипции. Существует множество видов метилирования гистонов, среди которых метилирование лизина 27 в гистоне H3 (H3K27me3) представляет собой яркий пример проявления сайленсинга генов (подавление экспрессии генов), являющийся консервативным в царстве животных и растений. Деметилирование H3K27me3 – обратный процесс, то есть удаление метильных групп с лизина, что приводит к релаксации хроматина и увеличению транскрипции генов. Лизин-специфические деметилазы – это белки, осуществляющие деметилирование. В настоящее время известно участие генов деметилаз в критических стадиях роста и развития растения, таких как прорастание семян, цветение, формирование плодов. Кроме того, показана их роль в формировании ответов на абиотические (засуха и засоление) и биотические (патогены, вредители) стрессы. Так, исследованиями ряда авторов у арабидопсиса показано участие генов деметилаз в прорастании семян на свету и переходе к цветению, в формировании солеи термоустойчивости и др. [1, 2, 3, 4]. На примере рисового гомолога *OsJMJ705* отмечена ключевая роль деметилазы в защите от стресса и патогенов через эпигенетическую регуляцию защитных генов, которые реагируют на жасминовую кислоту [5]. Более того, ген *OsJMJ705* необходим для правильного развития побегов, т. к. участвует в активации генов, контролирующих формирование меристемы [6].

У томата выявлено участие деметилазы SlJMJ6 гистона H3K27me3 в созревании плодов, SlJMJ4 – в АБК-опосредованном старении листьев, а у сахарного тростника – в ответ на засуху [7]. У картофеля показана роль генов деметилаз (*StJMJ)* в эпигенетической регуляции, модулирующей устойчивость картофеля к высоким температурам [8].

Таким образом, динамическое равновесие между метилированием и деметилированием гистонов, т. е. между работой метилтрансфераз и деметилаз, создает гибкую систему управления геномом, позволяя растениям быстро адаптироваться к меняющимся условиям окружающей среды в рамках агроэкосистем. Стратегии, основанные на изменении активности работы деметилаз, представляют собой не просто инструмент для улучшения агрономических характеристик и устойчивости сельскохозяйственных культур, а перспективный агроэкологический подход для создания самодо-

статочных сортов, способных поддерживать устойчивость агроценозов.

Кольцевые РНК (circRNA) – это класс РНК, образованных из прекурсорных молекул мРНК. Их общим свойством является образование кольцевой структуры. Изучение кольцевых РНК у растений привлекает внимание исследователей, прежде всего, из-за их возможности регулировать экспрессию генов. Возможным механизмом их действия является способность некоторых кольцевых РНК выступать в роли «губок» микроРНК (миРНК, miRNA), тем самым освобождая потенциальные мишени протеинкодирующих генов микроРНК [9, 10]. Кроме того, показано, что кольцевые РНК могут регулировать экспрессию родительского гена, связываясь с промоторным регионом. Немаловажным является свойство кольцевых РНК влиять на трансляцию линейных мРНК, повышая или снижая синтез целевого белка. И наконец, кольцевые РНК могут выступать мишенями для РНК-связывающих белков, выступая конкурентами для их линейных аналогов. Разнообразие механизмов действия кольцевых РНК позволяет влиять на различные биологические процессы в растениях. Ранее была показана роль некоторых кольцевых РНК на рост, развитие и формирование ответов на стрессовые факторы у арабидопсиса, томата, риса, пшеницы, сои и других растений [11, 12, 13].

Однако влияние кольцевых РНК на механизм метилирования гистонов к настоящему времени не выявлено. Прямых экспериментальных данных о взаимодействии кольцевых РНК и деметилаз у растений в настоящее время нет, но их функциональная взаимосвязь может быть выведена на основе общеизвестных молекулярных механизмов. Играя роль молекулярных губок для микроРНК, кольцевые РНК способны связывать специфические миРНК, тем самым предотвращая их взаимодействие с миРНК-мишенями. Если данные микроРНК нацелены на транскрипты генов деметилаз ДНК, то кольцевые RNA могут косвенно усиливать экспрессию этих деметилаз, ослабляя репрессию со стороны миРНК.

Кукуруза (*Zea mays* L.) – одна из важнейших зерновых культур, которая занимает лидирующие площади по валовым сборам. В первую очередь ее возделывают для получения зерна для пищевой промышленности (крупа, мука, крахмал и масло). Как кормовую культуру, кукурузу выращивают не только на зерно, но и для заготовки высокоэнергетичных силоса и сенажа, а также для использования в качестве зеленого корма. Из зерна и побочных продуктов кукурузы можно делать биотопливо и сырье для промышленности. Таким образом, благодаря своей универсальности и высокой урожайности, кукуруза является стратегической культурой. Как и выращивание других сельскохозяйственных культур, производство кукурузы в наше время сталкивается с рядом вызовов, в первую очередь с климатическими стрессами, биотическими угрозами и технологическими ограничениями уборки. Изменения климата во всем мире вынуждают селекционеров создавать сорта и гибриды, устойчивые к засухе, экстремально высоким и низким температурам. Стратегии создания новых линий, основанные на применении генетических технологий, в том числе влияние на экспрессию целевых генов с использованием деметилаз, ускоряет селекционный процесс и позволяет преодолевать биологические барьеры, недоступные традиционным методам.

Несмотря на то, что кукуруза очень хорошо изученная культура, о роли конкретных деметилаз в регуляции экспрессии ее генов известно сравнительно мало. В настоящее время у кукурузы выявлено 19 белков гистондеметилаз (JHDM), содержащих домен JmjC, которые разделены на три подсемейства и проанализированы их филогенетические связи, структура этих генов и профили экспрессии. Показано, что все 19 генов *ZmJMJ* по-разному экспрессируются в разных тканях и реагируют на повышенную температуру, что указывает на их потенциальную роль в реакции на тепловой стресс [14].

Изучение кольцевых РНК на кукурузе, как и на других растениях, началось сравнительно недавно. К настоящему моменту у данной культуры обнаружено несколько тысяч различных circRNA [15, 16, 17]. Экспрессия подавляющего большинства circRNA оказалась высокоспецифичной и зависела от генетического фона и условий абиотического стресса (засуха, солевой стресс), что указывает на их потенциальную вовлеченность в различные регуляторные сети. Анализ возможных функций показал, что 26 circRNA могут действовать как «губки» для микроРНК по механизму мимикрии мишени (target mimicry), в то время как 229 circRNA обладают высоким кодирующим потенциалом, предполагая, что circRNA в растениях могут выполнять функции

путем трансляции регуляторных пептидов [16]. В другой работе было продемонстрировано влияние кольцевых РНК на возможную адаптацию кукурузы к низкому содержанию азота в почве. Авторы обнаружили дифференциальную экспрессию 46 circRNA в ответ на стресс (высокое и низкое содержание азота), причем 24 в листьях и 22 в корнях. Функциональный анализ генов-источников этих circRNA показал их обогащение в процессах, связанных с метаболизмом азота, биосинтезом аминокислот и развитием корневой системы. Было предсказано, что 37 дифференциально-экспрессирующихся кольцевых РНК могут действовать как «губки» для микроРНК, и была построена сеть коэкспрессии circRNA–miRNA–mRNA, предполагающая их роль в посттранскрипционной регуляции ответа на дефицит азота [18]. Также на кукурузе была показана роль кольцевых РНК в ответе на засуху. Крупномасштабное профилирование выявило сотни circRNA у кукурузы и *Arabidopsis*, которые дифференциально экспрессировались при засухе, причем их гены были вовлечены в ключевые пути устойчивости [19]. В другом исследовании в корнях кукурузы было идентифицировано 8790 circRNA. Их количество и уровень экспрессии значительно возрастали в условиях засухи по сравнению с нормальным поливом [20]. Таким образом, изучение кольцевых РНК локусов деметилаз у кукурузы представляет актуальное направление, которое может открыть новые направления в селекции этой культуры.

Цель исследования – поиск, валидация и характеристика кольцевых РНК генов деметилаз у кукурузы в различных тканях на ранних стадиях развития.

Научная новизна – впервые для культуры кукурузы (*Zea mays* L.) экспериментально подтверждена и охарактеризована кольцевая РНК, транскрибируемая с локуса гена гистоновой лизин-специфической деметилазы.

Материал и методы. Проростки кукурузы выращивали на питательной среде Мурасиге-Скуга (MS) в условиях 16 часов света в сутки при температуре 24 ºС в течение 10 дней.

Выделение ДНК растений проводили с помощью набора DU-50 «Биолабмикс» (Россия) по инструкции производителя. РНК выделяли из листьев и корней молодых проростков кукурузы набором ExtractRNA («Евроген», Россия) согласно инструкции производителя; кДНК получали с использованием SuperScriptII (ThermoFisher, США) и случайного праймера.

Праймеры подбирали с помощью Primer-Blast. Для идентификации сайта обратного сплайсинга в качестве матрицы использовали последовательность линейной РНК и впоследствии инвертировали подобранные праймеры, делая их дивергентными (табл. 1) [21]. Амплификацию целевых фрагментов проводили в следующих условиях: 95 ºС – 5 мин. (95 ºС – 20 сек., 60 ºС – 15 сек., 72 ºС – 30 сек.) – 35 циклов, 72 ºС – 3 мин. Визуализацию синтезированных фрагментов осуществляли в 1,2%-м агарозном геле с бромистым этидием на Gel Doc^{TM} XR+ Bio-Rad.

Аннотированные локусы деметилаз были взяты из работы Е. Цянь с соавт. (Y. Qian et al.) [14]. Предсказанные кольцевые РНК у кукурузы, представленные в базе данных PlantcircBase7.0, сопоставляли с локализацией генов деметилаз и отбирали все пересекаемые последовательности, которые использовали для валидации целевых молекул [22].

Результаты и их обсуждение. Пересечение базы данных кольцевых РНК с соответствующей аннотацией генома кукурузы (*Z. mays* RefGen_V4) позволило установить шесть локусов с предсказанными шестью кольцевыми РНК (табл. 2) из 22 существующих Jmj-домен-содержащих генов деметилаз. Кольцевые РНК относятся к четырем типам: e-circRNA – 1; u-circRNA – 1; ue-circRNA – 2; ui-circRNA – 2. Наиболее представительными являются типы ue-circRNA, в которой один сайт обратного сплайсинга находится в нетранслируемом участке мРНК, а другой – в экзоне; и ui-circRNA, где второй сайт находится в интроне. К типу u-circRNA относят кольцевые РНК, которые аннотируются в нетранслируемой области гена, к типу ui-circRNA – сайты сплайсинга в нетранслируемой области и интроне.

Все отобранные нами circRNA (табл. 2) были предсказаны на основе данных РНК-секвенирования разными авторами.

Для всех последовательностей предсказанных кольцевых РНК были разработаны праймеры для амплификации с кДНК линейного транскрипта (конвергентные олигонуклеотиды) и фрагмента обратного сплайсинга (дивергентные, обратно направленные) в случае, если образуется кольцевая форма РНК.

Таблица 1 – **Используемые праймеры для амплификации сайтов обратного сплайсинга /**
Table 1 – **Primers used to amplify back-splicing sites**

Название / Name	*Нуклеотидная последовательность / Nucleotide sequence*	*Название circRNA / Name of circRNA*
001760f	AGGGCAACAAAAGGTCCGAA	zma_circ_001760
001760r	GGGTGCAGCAAAACCAAGAG	zma_circ_001760
L001760f	AGTTGCAGGAGGTCACTTCG	мРНК zma_circ_001761
L001760r	TGGAGGTTTCCATGAAGGCG	мРНК zma_circ_001761
001761f	TGGGTCAGTTGGCTGGAGTA	zma_circ_001761
001761r	GCGCTTTGCGGTATAAACGA	zma_circ_001761
001762f	CGAAGTGACCTCCTGCAACT	zma_circ_001762
001762r	GTCCCCACCTTCAAAAGATAGTA	zma_circ_001762
003117f	CAGGCCCAATGGTGTCTCAT	zma_circ_003117
003117r	GTGCCCTCGTTGTAGGAACA	zma_circ_003117
005088f	AGGGGAATGCGTCTGGACTA	zma_circ_005088
005088r	GGACATCCTGCCGGGATAAA	zma_circ_005088
006309f	TGGGTCAGTTGGCTGGAGTA	zma_circ_006309
006309r	GCGCTTTGCGGTATAAACGA	zma_circ_006309

Таблица 2 – **Локусы деметилаз и характеристики соответствующих кольцевых РНК, представленных в базе данных PlantCircBase7.0 /**
Table 2 – **Demethylase loci and characteristics of associated circular RNAs listed in the PlantCircBase7.0 database**

Локус / Locus	*№ кольцевой РНК / Id of circRNA*	*Тип / Type*	*Тканеспецифичность / Tissue specificity*	*Ссылка / Reference*
Zm00001d051959	001760	e-circ	Листья проростков / Seedling leaves	[17]
Zm00001d051961	001761	u-circ	Листья проростков / Seedling leaves	[17]
Zm00001d051965	001762	ue-circ	Листья проростков / Seedling leaves	[17]
Zm00001d023788	003117	ui-circ	Листья проростков / Seedling leaves	[17]
Zm00001d017700	005088	ue-circ	Метелка / Tassel	[15]
Zm00001d026501	006309	ui-circ	Проростки / Seedlings	[15]

Из шести отобранных кольцевых форм удалось показать наличие всего одного локуса, который транскрибирует кольцевую форму РНК (рис. 1) в листьях и корнях проростков кукурузы. Размер амплифицированного фрагмента с дивергентными праймерами (713) совпадает с теоре-

тически рассчитанными с учетом отсутствия интронов (рис. 1, дорожки 2 и 3). Конвергентные праймеры амплифицировали линейные транскрипты, которые соответствуют аннотированному локусу Zm00001d051961, учитывая сплайсинг всех интронов (рис. 2, дорожки 6, 7). Помимо основного транскрипта, включающего все аннотированные экзоны, в небольшом количестве амплифицируются еще 4 отличных по размеру фрагмента, что указывает на существование альтернативного сплайсинга исследуемого локуса. Амплификация геномной ДНК с конвергентными праймерами также показала соответствие длины фрагмента аннотированному локусу. Более того, с использованием дивергентных праймеров была зарегистрирована слабая амплификация (в листьях молодых проростков) альтернативных форм кольцевых молекул РНК (через синтез кДНК), в которых, по всей видимости, некоторые экзоны отсутствуют. Данное предположение требует дальнейшей валидации. Нами также установлена тканеспецифическая транскрипция линейных транскриптов и кольцевых молекул. Так, в корнях уровень экспрессии кольцевых форм очень слабый, тогда как в листьях наоборот. В случае с линейными формами в молодых листочках присутствуют две альтернативные изоформы транскрипта гена деметилазы, а в корнях – одна. Причем альтернативные изоформы в листьях и корнях отличаются по размеру.

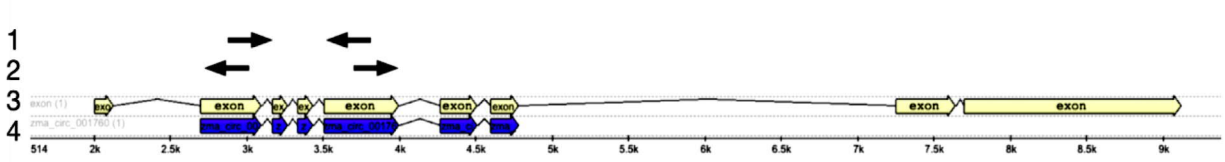


Рис. 1. **Структура локуса лизин-специфической деметилазы Zm00001d051959 (***ZmJMJ2***).** Дорожки: 1 – конвергентные праймеры для амплификации мРНК; 2 – дивергентные праймеры для амплификации сайта обратного сплайсинга; 3 – мРНК транскрипт; 4 – предсказанная последовательность кольцевой РНК 001760 /

Fig. 1. **Structure of the lysine-specific demethylase locus Zm00001d051959 (***ZmJMJ2***).** Tracks: 1 – convergent primers for mRNA amplification; 2 – Divergent primers for back-splicing site amplification; 3 – mRNA transcript; 4 – Predicted circRNA001760 sequence

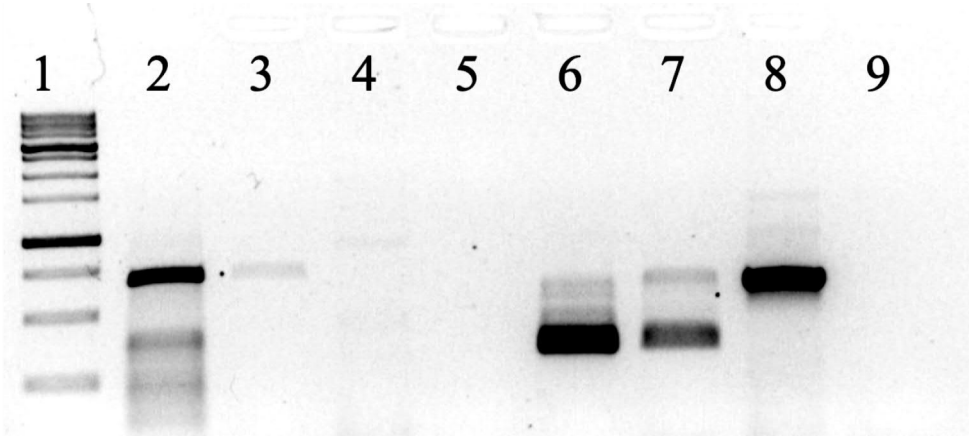


Рис. 2. **Агарозный электрофорез ампликонов кДНК с конвергентными и дивергентными праймерами.** Дорожки: 1 – маркер молекулярного веса 1 kb; **2–5 – ампликоны кДНК с дивергентных праймеров** zma_c_001760f/r (713 пн): 2 – кДНК листья, 3 – кДНК корни, 4 – ДНК, 5 – отрицательный контроль; **6–9 – ампликоны кДНК с конвергентных праймеров** zma_l_001761f/r: 6 – кДНК листья, 7 – кДНК корни, 8 – ДНК, 9 – отрицательный контроль

Fig. 2. **Agarose electrophoresis of cDNA amplicons obtained with convergent and divergent primers.** Tracks: 1 – 1 kb molecular weight marker; **2–5 – cDNA amplicons obtained with divergent primers** zma_c_001760f/r (713 bp): 2 – cDNA from leaves, 3 – cDNA from roots, 4 – genomic DNA, 5 – negative control; **6–9 – cDNA amplicons obtained with convergent primers** zma_l_001761f/r: 6 – cDNA from leaves, 7 – cDNA from roots, 8 – genomic DNA, 9 – negative control

Фрагмент амплификации кДНК с дивергентными праймерами был секвенирован методом Сэнгера с теми же олигонуклеотидами. Результаты секвенирования убедительно показали наличие обратного сплайсинга РНК, который происходит между 5'-концом второго

экзона и 3'-концом седьмого экзона. Установлены сигналы сплайсирования, а именно донорный и акцепторный сайты “AC” и “GT”, что является характерным для кукурузы. Кроме того, показано, что в формировании кольцевой структуры участвуют только экзоны 2 и 7 (рис. 3).

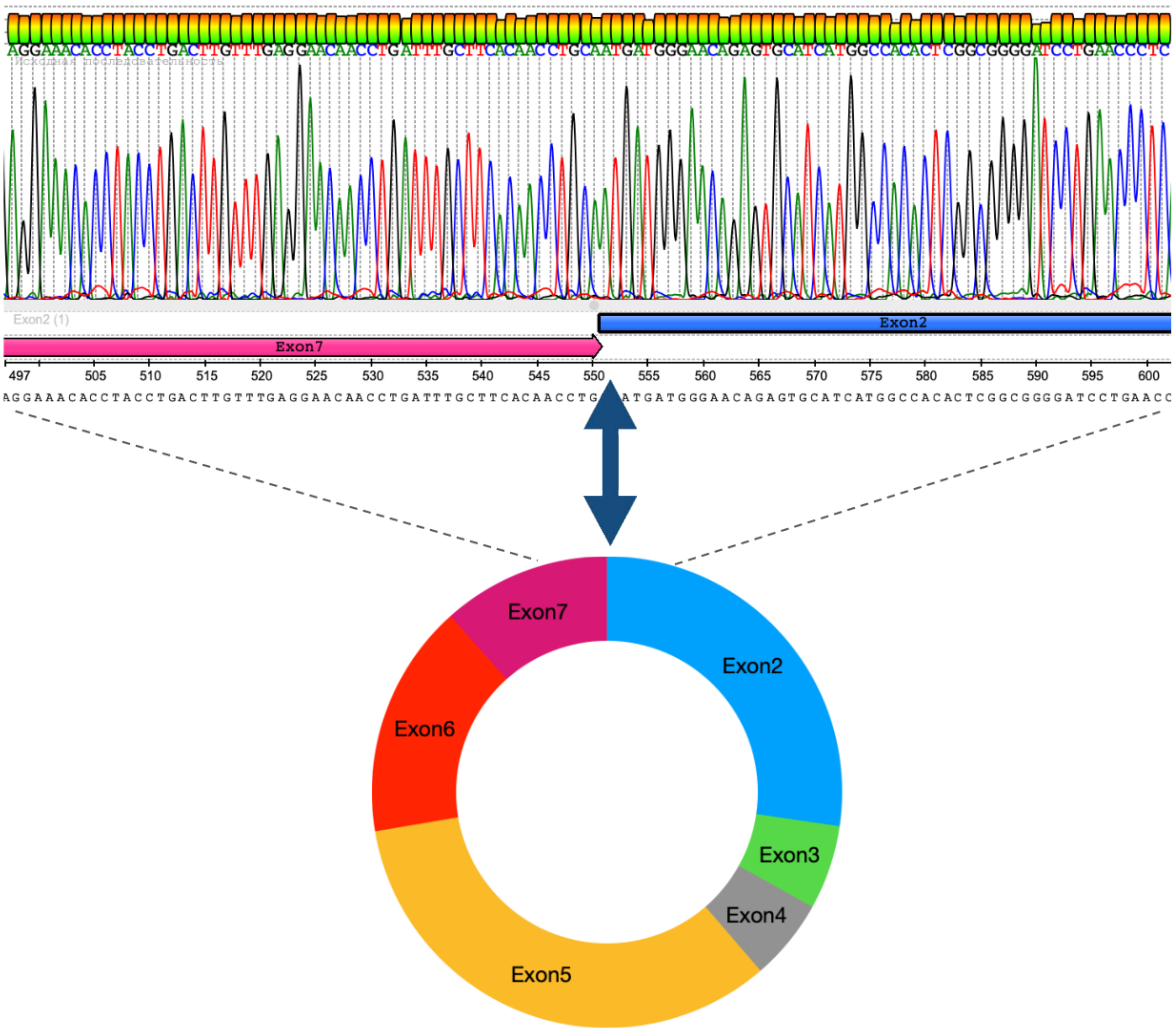


Рис. 3. **Хроматограмма секвенирования фрагмента кДНК и структура кольцевой РНК 001761.** Идентифицированный сайт обратного сплайсинга указан двойной стрелкой /

Fig. 3. **Sequencing chromatogram of the cDNA fragment and the structure of the circular RNA 001761.** The identified backsplicing site is indicated by a double arrow

Размер всей молекулы РНК составляет 2016 нуклеотидов. Полученные данные подтверждают, что локус деметилазы Zm00001d051961 в листьях молодых проростков кукурузы активно транскрибирует кольцевые молекулы РНК, которые образуются соединением 7-го и 2-го экзонов.

Заключение. В ходе проведенного исследования экспериментально подтверждена транскрипция кольцевой РНК с локуса гена деметилазы гистонов Zm00001d051961 у кукурузы. Установленная тканеспецифическая экспрессия как линейных, так и кольцевой форм данного гена позволяет предположить, что выявленная circRNA может участвовать в тонкой регуляции активности деметилазы за счет РНК-ДНК или РНК-белковых взаимодействий, потенциально влияя на эпигенетический статус хроматина. Поскольку метилирование/деметилирование гистонов является ключевым механизмом адаптации растений к абиотическим и биотическим стрессам, обнаруженная связь между геном эпигенетического регулятора и образованием кольцевой РНК открывает новые перспективы для агроэкологии. В будущем манипуляция подобными circRNA может стать инструментом для направленного изменения эпигенетической пластичности сельскохозяйственных культур с целью повышения их устойчивости в условиях меняющейся среды при снижении пестицидной и агрохимической нагрузки.

References

1. Wang Y., Gu D., Deng L., He C., Zheng F., Liu X. The Histone H3K27 Demethylase REF6 Is a Positive Regulator of Light-Initiated Seed Germination in Arabidopsis. Cells. 2023;12(2):295. DOI: https://doi.org/10.3390/cells12020295

2. Shafiq S., Berr A., Shen W.-H. Combinatorial functions of diverse histone methylations in *Arabidopsis thaliana* flowering time regulation. New Phytologist. 2014;201(1):312–322. DOI: https://doi.org/10.1111/nph.12493

3. Shen Y., Conde e Silva N., Audonnet L., Servet C., Wei W., Zhou D-X. Over-expression of histone H3K4 demethylase gene JMJ15 enhances salt tolerance in Arabidopsis. Frontiers in Plant Science. 2014;5:290. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00290

4. He K., Mei H., Zhu J., Qiu Q., Cao X., Deng X. The histone H3K27 demethylase REF6/JMJ12 promotes thermomorphogenesis in Arabidopsis. National Science Review. 2022;9(5): nwab213. DOI: https://doi.org/10.1093/nsr/nwab213

5. Li T., Chen X., Zhong X., Zhao Y., Liu X., Zhou S. et al. Jumonji C Domain Protein JMJ705-Mediated Removal of Histone H3 Lysine 27 Trimethylation Is Involved in Defense-Related Gene Activation in Rice. The Plant Cell. 2013;25(11):4725–4736. DOI: https://doi.org/10.1105/tpc.113.118802

6. Cheng S., Tan F., Lu Y., Liu X., Li T., Yuan W. et al. WOX11 recruits a histone H3K27me3 demethylase to promote gene expression during shoot development in rice. Nucleic Acids Research. 2018;46(5):2356–2369. DOI: https://doi.org/10.1093/nar/gky017

7. Crevillén P. Histone Demethylases as Counterbalance to H3K27me3 Silencing in Plants. iScience. 2020;23(11):101715. DOI: https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101715

8. Mali S., Dutta M., Goel K., Raturi V., Kundu P., Kumar R. et al. High Temperature Triggers Differential Expression of JUMONJI C (JmjC) Domain-Containing Histone Demethylase Genes in Leaf and Stolon Tissues of Potato (*Solanum tuberosum* L.) Genotypes. Journal of Plant Growth Regulation. 2025;44(4):1500–1514. DOI: https://doi.org/10.1007/s00344-023-11094-w

9. Hansen T. B., Jensen T. I., Clausen B. H., Bramsen J. B., Finsen B., Damgaard C. K. et al. Natural RNA circles function as efficient microRNA sponges. Nature. 2013;495:384–388. DOI: https://doi.org/10.1038/nature11993

10. Li S., Wang J., Ren G. CircRNA: An emerging star in plant research: A review. International Journal of Biological Macromolecules. 2024;272(2):132800. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132800

11. Liu R., Ma Y., Guo T., Li G. Identification, biogenesis, function, and mechanism of action of circular RNAs in plants. Plant Communications. 2023;4(1):100430. DOI: https://doi.org/10.1016/j.xplc.2022.100430

12. Su Y., Yi Y., Ge S., Wang Z., Wei Z., Liu X. et al. Circular RNAs derived from MIR156D promote rice heading by repressing transcription elongation of pri-miR156d through R-loop formation. Nature Plants. 2025;11:709–716. DOI: https://doi.org/10.1038/s41477-025-01961-7

13. Liu X., Wang P., Wang S., Liao W., Ouyang M., Lin S. et al. The circular RNA circANK suppresses rice resistance to bacterial blight by inhibiting microRNA398b-mediated defense. The Plant Cell. 2025;37(4):koaf082. DOI: https://doi.org/10.1093/plcell/koaf082

14. Qian Y., Chen C., Jiang L., Zhang J., Ren Q. Genome-wide identification, classification and expression analysis of the JmjC domain-containing histone demethylase gene family in maize. BMC Genomics. 2019;20(1):256. DOI: https://doi.org/10.1186/s12864-019-5633-1

15. Tang B., Hao Z., Zhu Y., Zhang H., Li G. Genome-wide identification and functional analysis of circRNAs in *Zea mays*. Preiss T, editor. PLOS ONE. 2018;13(12):e0202375. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202375

16. Han Y., Li X., Yan Y., Duan M. H., Xu J. H. Identification, characterization, and functional prediction of circular RNAs in maize. Molecular Genetics and Genomics. 2020;295(2):491–503. DOI: https://doi.org/10.1007/s00438-019-01638-9

17. Chen L., Zhang P., Fan Y., Lu Q., Li Q., Yan J. et al. Circular RNAs mediated by transposons are associated with transcriptomic and phenotypic variation in maize. New Phytologist. 2018;217(3):1292–1306. DOI: https://doi.org/10.1111/nph.14901

18. Ma P., Gao S., Zhang H. Y., Li B. Y., Zhong H. X., Wang Y. K. et al. Identification and characterization of circRNAs in maize seedlings under deficient nitrogen. Whelan J, editor. Plant Biology. 2021;23(5):850–860. DOI: https://doi.org/10.1111/plb.13280

19. Zhang P., Fan Y., Sun X., Chen L., Terzaghi W., Bucher E. et al. A large-scale circular RNA profiling reveals universal molecular mechanisms responsive to drought stress in maize and Arabidopsis. The Plant Journal. 2019;98(4):697–713. DOI: https://doi.org/10.1111/tpj.14267

20. Xu J., Wang Q., Tang X., Feng X., Zhang X., Liu T. et al. Drought-induced circular RNAs in maize roots: Separating signal from noise. Plant Physiology. 2024;196(1):352–367. DOI: https://doi.org/10.1093/plphys/kiae229

21. Ye J., Coulouris G., Zaretskaya I., Cutcutache I., Rozen S., Madden T. L. Primer-BLAST: A tool to design target-specific primers for polymerase chain reaction. BMC Bioinformatics. 2012;13(1):134. DOI: https://doi.org/10.1186/1471-2105-13-134

22. Xu X., Du T., Mao W., Li X., Ye C. Y., Zhu Q. H. et al. PlantcircBase 7.0: Full-length transcripts and conservation of plant circRNAs. Plant Communications. 2022;3(4):100343. DOI: https://doi.org/10.1016/j.xplc.2022.100343

Вклад авторов: Князев А. Н., Разумова О. В. – концепция и план исследований, анализ данных, подготовка рукописи; Ефремова Л. Н., Смотрова Ю. Н. – анализ данных, подготовка рукописи; Харченко П. Н. – концепция и план исследований, подготовка рукописи.

Сведения об авторах

✉ **Князев Андрей Николаевич**, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории прикладной геномики и частной селекции сельскохозяйственных растений, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», ул. Тимирязевская, д. 42, г. Москва, Российская Федерация, 127550, e-mail: iab@iab.ac.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0595-9061**, e-mail: agrofak@gmail.com

Разумова Ольга Владимировна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории прикладной геномики и частной селекции сельскохозяйственных растений, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», ул. Тимирязевская, д. 42, г. Москва, Российская Федерация, 127550, e-mail: iab@iab.ac.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5157-0087**

Ефремова Лариса Николаевна, младший научный сотрудник лаборатории прикладной геномики и частной селекции сельскохозяйственных растений, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», ул. Тимирязевская, д. 42, г. Москва, Российская Федерация, 127550, e-mail: iab@iab.ac.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1579-438X**

Смотрова Юлия Николаевна, лаборант-исследователь лаборатории прикладной геномики и частной селекции сельскохозяйственных растений, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», ул. Тимирязевская, д. 42, г. Москва, Российская Федерация, 127550, e-mail: iab@iab.ac.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9179-2203**

Харченко Петр Николаевич, доктор биол. наук, академик РАН, научный руководитель ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии», ул. Тимирязевская, д. 42, г. Москва, Российская Федерация, 127550, e-mail: iab@iab.ac.ru,
ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7054-8801

Author Contributions: Knyazev A. N., Razumova O. V. – research concept and plan, data analysis, manuscript preparation; Efremova L. N., Smotrova Yu. N. – data analysis, manuscript preparation; Kharchenko P. N. – research concept and plan, manuscript preparation.

Information about the authors

✉ **Andrey N. Knyazev**, PhD in Biological Science, senior researcher, the Laboratory of Applied Genomics and Private Breeding of Agricultural Plants, All-Russian Research Institute of Agricultural Biotechnology, Timiryazevskaya St., 42, Moscow, Russian Federation, 127550, e-mail: iab@iab.ac.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0595-9061, e-mail: agrofak@gmail.com

Olga V. Razumova, PhD in Biological Science, senior researcher, the Laboratory of Applied Genomics and Private Breeding of Agricultural Plants, All-Russian Research Institute of Agricultural Biotechnology, Timiryazevskaya St., 42, Moscow, Russian Federation, 127550, e-mail: iab@iab.ac.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5157-0087**

Larisa N. Efremova, junior researcher, the Laboratory of Applied Genomics and Private Breeding of Agricultural Plants, All-Russian Research Institute of Agricultural Biotechnology, Timiryazevskaya St., 42, Moscow, Russian Federation, 127550, e-mail: iab@iab.ac.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1579-438X**

Yuliya N. Smotrova, research laboratory assistant, the Laboratory of Applied Genomics and Private Breeding of Agricultural Plants, All-Russian Research Institute of Agricultural Biotechnology, Timiryazevskaya St., 42, Moscow, Russian Federation, 127550, e-mail: iab@iab.ac.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0005-9179-2203**

Petr N. Kharchenko, DSc in Biological Science, Academician of the Russian Academy of Sciences, scientific supervisor, All-Russian Research Institute of Agricultural Biotechnology, Timiryazevskaya St., 42, Moscow, Russian Federation, 127550, e-mail: iab@iab.ac.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0008-7054-8801**

✉ – Для контактов / Corresponding author

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ МИКРОБИОЛОГИЯ И МИКОЛОГИЯ / AGRICULTURAL MICROBIOLOGY AND MYCOLOGY

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.359–367
УДК 636.085.19:636.086.1/.3:632.4(470)

Микотоксикологический анализ сорго-суданкового гибрида BMR-типа в ходе вегетации

© 2026. Г. П. Кононенко✉, А. А. Буркин, Е. В. Зотова, Е. А. Пирязева
Всероссийский научно-исследовательский институт ветеринарной санитарии, гигиены и экологии – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной ветеринарии имени К. И. Скрябина и Я. Р. Коваленко Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация

Высокоурожайные сорго-суданковые гибриды с пониженным содержанием лигнина, полученные с применением генной технологии «brown-midrib gene 6», рекомендованы и успешно применяются для силосования, но оценка их санитарно-значимых показателей только начинается. В данной работе сообщается о контаминации микроскопическими грибами и микотоксинами растений сорго-суданкового гибрида Нутритон Стар, отобранных с участка опытного поля (РГАУ-МСХА, Московская область) в период от кущения до завершения фазы «выход в трубку». В составе микобиома доминировали грибы Alternaria (68,8 %), с меньшей частотой представлены таксоны Fusarium (25,0 %) и Penicillium (12,5 %), в числе редких были Cladosporium и Aspergillus (6,3 %). Изоляты Alternaria преимущественно принадлежали виду A. tenuissima и в биотесте in vitro показали высокий потенциал биосинтеза альтернариола. Иммуноферментным анализом в листьях растений, отобранных в фазы «кущение» и «выход в трубку», выявлены: альтернариол (13–30 мкг/кг), эмодин (32–95 мкг/кг), охратоксин А (6–12 мкг/кг); в фазе «выход в трубку» – микофеноловая кислота (19–64 мкг/кг). Количества афлатоксина B_1 (3–5 мкг/кг) были близки пределу определения, накопление циклопиазоновой кислоты и эргоалкалоидов варьировало при смене фаз развития. В стеблевых частях растений случаи обнаружения циклопиазоновой кислоты, эргоалкалоидов и эмодина были единичными. Аналиты – Т-2 токсин, дезоксиниваленол, диацетоксисцирпенол, зеараленон, фумонизины группы В, цитринин, стеригматоцистин, PR-токсин и роридин А не обнаружены. Полученная информация важна для совершенствования подходов к оценке качества сорговых кормов.

Ключевые слова: *сорго кормовое, Нутритон Стар, надземная биомасса, листья, стебли, микромицеты, микотоксины, иммуноферментный анализ*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной ветеринарии имени К. И. Скрябина и Я. Р. Коваленко Российской академии наук» (тема № FGUG-2025-0002).

Авторы благодарят П. Ф. Василькова, аспиранта кафедры экологии ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», за содействие в проведении полевого опыта.

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Кононенко Г. П., Буркин А. А., Зотова Е. В., Пирязева Е. А. Микотоксикологический анализ сорго-суданкового гибрида BMR-типа в ходе вегетации. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):359–367. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.359-367

Поступила в редакцию: 06.12.2025
Доработана после рецензирования: 26.02.2026
Принята к публикации: 19.03.2026
Опубликована онлайн: 27.04.2026

Mycotoxicological analysis of the BMR-type sorghum-sudangrass hybrid during vegetation

© 2026. Galina P. Kononenko✉, Aleksey A. Burkin, Elena V. Zotova, Elena A. Piryazeva

All-Russian Research Institute for Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology – branch of Federal Scientific Centre VIEV, Moscow, Russian Federation

High-yielding sorghum-sudangrass hybrids with reduced lignin content, obtained using the "brown-midrib gene 6" gene technology, are recommended and successfully used for silage, but their sanitary-relevant features are only beginning to be evaluated. This paper reports on contamination with microscopic fungi and mycotoxins of the plants of sorghum-sudangrass hybrid of the 'NutriTop Star', which were collected from an experimental field (Russsian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow region) during the period from tillering to the end of the stem elongation phase. The mycobiome was dominated by Alternaria fungi (68.8 %), with Fusarium (25.0 %) and Penicillium (12.5 %) taxa being less common, and Cladosporium and Aspergillus (6.3 %) being rare. The Alternaria isolates were predominantly A. tenuissima and in vitro biotests showed a high potential for the biosynthesis of alternariol. Enzyme immunoassay revealed the following in the leaves of plants collected in the "tillering" and "stem elongation" phases: alternariol (13–30 μg/kg), emodin (32–95 μg/kg), ochratoxin A (6–12 μg/kg) and mycophenolic acid in the stem elongation phase (19–64 μg/kg). The amounts of aflatoxin B_1 (3–5 μg/kg) were close to the limit of detection, and the accumulation of cyclopiazonic acid and ergot alkaloids varied with the change of growth phases. In the stem parts of the plants, the detection of cyclopiazonic acid, ergot alkaloids, and emodin was rare. Analytes – T-2 toxin, deoxynivalenol, diacetoxyscirpenol, zearalenone, group B fumonisins, citrinin, sterigmatocystin, PR-toxin and roridin A were not detected. The information obtained is important for improving approaches to assessing the quality of sorghum feed.

Keywords: *forage sorghum, 'Nutritop Star', aboveground plant biomass, leaves, stems, mycotoxins, enzyme immunoassay*

Acknowledgements: the research was carried under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Scientific Centre VIEV (topic No. FGUG-2025-0002).

The authors thank P. F. Vasilkov, a postgraduate student of the Department of Ecology at the Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, for his assistance in conducting the field experiment.

The authors thank the reviewers for their contribution to the expert evaluation of this work.

Conflict of interests: the authors stated that there was no conflict of interests.

For citation: Kononenko G. P., Burkin A. A., Zotova E. V., Piryazeva E. A. Mycotoxicological analysis of the BMR-type sorghum-sudangrass hybrid during vegetation. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):359–367. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.359-367

Received: 06.12.2025 Accepted for publication: 19.03.2026
Revised: 26.02.2026 Published online: 27.04.2026

Для безопасного использования кормовых растений важно иметь точное представление о рисках инфицирования микроскопическими грибами родов *Fusarium* Link, *Alternaria* Nees, *Penicillium* Link, *Aspergillus* P. Micheli ex Haller, *Trichoderma* Pers., *Cladosporium* Link, которые способны к образованию токсичных для животных метаболитов [1, 2]. Потенциально токсигенные виды служат источником внутренней контаминации растений микотоксинами, связанные формы которых могут быть определены методом иммуноферментного анализа [3, 4]. В нашей стране сведения о комплексах микотоксинов в кормовых культурах, выращенных при регулярном фитосанитарном контроле, получены для ячменя, пшеницы, овса [5], рапса, сурепицы [6] и недавно – для кукурузы [7].

В последнее время на выпас, зеленый корм и силосование все чаще начинают применять сорго-суданковые гибриды, обладающие высокой урожайностью, кормовой ценностью, адаптивностью к стресс-факторам [8, 9] и смене почвенно-климатических условий [10, 11]. В Российской Федерации зарегистрированы новейшие разработки селекционеров – два гибрида Нутритоп Стар и Джабо Стар с пониженным содержанием лигнина, полученные с применением генной технологии "*brown-midrib gene* 6" (BMR 6) [12]. При оценке кормовой пригодности сорго и его гибридов основное внимание обращают на давно известный и крайне опасный фактор риска – дуррин, цианогенный β-D-глюкозид нитрила 4-оксиминдальной кислоты, вызывающий острые летальные отравления животных [13]. Формирование базы данных по комплексной микотоксикологической оценке этих растений только начинается.

Цель исследования – оценить характер внутренней контаминации зеленой массы сорго-суданкового гибрида Нутритоп Стар микроскоспическими грибами и микотоксинами.

Научная новизна – у вегетирующего травяного сорго впервые в составе внутренней микобиоты, наряду с микромицетами родов *Fusarium*, *Cladosporium, Penicillium*, *Aspergillus,* выявлены потенциально токсигенные виды *Alternaria* и определен характер эндогенной контаминации микотоксинами методом иммуноферментного анализа.

Материал и методы. Трехлинейный сорго-суданковый гибрид (*Sorghum xdummondii* (Steud.) Millsp. & Chase) типа BMR-6 (сорт Нутритоп Стар, код 8756950, оригинатор Advanta Seed International, Индия) выращивали в 2024 г. на участке Полевой опытной станции РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева (Московская область) с дерново-подзолистой почвой. Посев проводили 30 мая 2024 г. семенами с всхожестью 85–90 % на 4 делянках размером 2×2 м, по 16 семян в каждой (2 ряда по 8 семян) с расстоянием между растениями 20 см, между рядами – 60 см. Через месяц с делянок на протяжении двух месяцев еженедельно срезали надземные части растений на высоте 3–5 см от поверхности почвы. Первые сборы (26.06 и 1.07) проводили при появлении 5–7-го листа (фаза «кущение»), следующие (8.07 и 15.07) – в начале фазы «выход в трубку» и далее (23.07, 30.07, 5.08, 12.08, 30.08) до выхода 12-го листа (до появления метелки из влагалища). В фазе «кущение» для анализа использовали листья, от всех последующих сборов растения разделяли на листовые пластинки и стеблевые части сразу после доставки в лабораторию.

Для микологического анализа фрагменты (1,0–1,5 см) листьев и стеблей, помещенные в марлевые мешочки, выдерживали 40 сек в 3%-м растворе формальдегида и затем двукратно обрабатывали раствором, приготовленным в 1 л стерильной дистиллированной воды с добавлением 4 мл 25%-го раствора аммиака. Далее по 15–50 фрагментов равномерно раскладывали в чашки Петри на агар Чапека-Докса (Czapek Dox agar, CDA), содержащий 10 % медицинской желчи и антибиотики (50 тыс. ЕД пенициллина и 100 тыс. ЕД стрептомицина). Посевы выдерживали при 25 ºС в течение 7–10 сут, культуры с признаками, типичными для родов *Alternaria, Fusarium*, *Penicillium*, *Cladosporium*, *Aspergillus,* отсевали на чашки с CDA, желчью и антибиотиками, а затем – в пробирки на скошенный CDA. Встречаемость грибов этих таксонов, определенную как долю положительных образцов от общего их числа, и степень контаминации образца по числу инфицированных фрагментов выражали в процентах. Видовую принадлежность культур *Alternaria* определяли в соответствии с таксономической системой [14].

Для тестирования токсинообразования изолятов *Alternaria* в качестве ростовых сред использовали солодовый агар (Liofilchem®, Италия) и агар V-8, приготовленный из сока (V8®, Campbell Soup Company, США). Во флаконы вместимостью 10 мл и диаметром дна около 18 мм, содержащие по 1,5 мл агаровых сред, вносили кусочки инокулюма (10-суточной культуры на агаре Чапека-Докса), закрывали ватно-марлевыми пробками и обертывали их слоем лабораторной пленки (Parafilm M® PM-996, Pechiney Plastic Packing, США). После инкубирования в темноте в течение 7 сут при 25 ºС в каждый флакон добавляли по 1,5 мл смеси ацетонитрила и воды в объемном соотношении 84:16, интенсивно встряхивали в начале и конце стационарной 14-часовой экстракции. Анализ экстрактов выполняли с помощью иммуноферментной тест-системы «Альтернариол-ИФА» (рег. № 0005-08-ВНИИВСГЭ) с пределом детектирования токсина 0,01 мкг/г среды. Каждый вариант опыта выполняли в трех повторностях, стандартные ошибки средних не превышали 15 %.

Для определения микотоксинов отобранные образцы листьев и стеблей (общее число – 61) выдерживали в интенсивно вентилируемом боксе до воздушно-сухого состояния и затем измельчали в лабораторной мельнице. Для экстракции применяли смесь ацетонитрила и воды в объемном соотношении 84:16 при расходе 10 мл на 1 г навески. Экстракты после 10-кратного разбавления фосфатно-солевым буферным раствором pH = 7,5 с Tween 20 использовали для непрямого конкурентного иммуноферментного анализа. Микотоксины – Т-2 токсин (Т-2), дезоксиниваленол (ДОН), диацетоксисцирпенол (ДАС), зеараленон (ЗЕН), фумонизины группы В (ФУМ), эргоалкалоиды (ЭА), альтернариол (АОЛ), роридин А (РОА), афлатоксин B_1 (AB_1), стеригматоцистин (СТЕ), циклопиазоновую кислоту (ЦПК), эмодин (ЭМО), охратоксин А (ОА), цитринин (ЦИТ), микофеноловую кислоту (МФК), PR-токсин (PR) –

анализировали с помощью аттестованных коммерческих и исследовательских иммуноферментных тест-систем [СТО 00494143.01-2015[1]]. Нижние пределы количественных измерений соответствовали 85%-му уровню связывания антител и составляли 1 ($АВ_1$, ЭА), 2 (Т-2, ОА, СТЕ), 5 (РОА), 10 (АОЛ, МФК, ЗЕН, ЭМО, ЦИТ, ЦПК), 40 (ДОН, ФУМ) и 100 (ДАС, PR) нг/г (мкг/кг). Среднее содержание микотоксина по выборке определяли как среднее арифметическое величин, полученных для положительных образцов.

Результаты и их обсуждение. В процессе наблюдения за растениями внешних признаков грибных заболеваний не отмечали.

Внутренняя микобиота листьев и стеблей в период наблюдений была представлена преимущественно микромицетами родов *Alternaria* и *Fusarium*, реже – *Cladosporium, Penicillium* и *Aspergillus* (табл. 1).

Таблица 1 – **Результаты микологического анализа листьев и стеблей сорго-суданкового гибрида Нутритоп Стар /**
Table 1 – **Results of mycological analysis of leaves and stems of the 'NutriTop Star' sorghum-sudangrass hybrid**

Таксон / Taxon	*Встречаемость микромицетов (n^+/n) / Степень контаминации образцов (мин.– макс.), % / Occurrence of micromycetes (n^+/n) / Degree of contamination of samples (min. – max.), %*		
	*листья / leaves **	*стебли / stems***	*суммарно / in total*
Alternaria	77,8 / 1,9–28,0	57,1 / 3,1–17,6	68,8 / 1,9–28,0
Fusarium	22,2 / 2,0–4,0	28,6 / 3,1–17,6	25,0 / 2,0–17,6
Penicillium	11,1 / -	14,3 / -	12,5 / -
Cladosporium	11,1 / -	-	6,3 / -
Aspergillus	-	14,3 / -	6,3 / -

Примечания: *n* – общее число образцов; n^+ – число положительных образцов; прочерк означает, что микромицеты не обнаружены; * отбор в фазы «кущение» и «выход в трубку»; ** отбор в фазу «выход в трубку» /

Notes: *n* is the total number of samples; n^+ is the number of positive samples, and a dash means that no micromycetes were detected; * collecting during "tillering" and "stem elongation" phases; ** collecting during "stem elongation" phase

Всего было получено 20 чистых культур рода *Alternaria*, 18 из них принадлежали виду *A. tenuissima* (Nees et T. Nees: Fries) Wiltshire и два – *A. arborescens* E. G. Simmons (из листьев в фазу «кущение») и *A. alternata* (Fr.) Keissler (из листьев в фазу «выход в трубку»). Тестирование на агаровых средах, оптимальных для их токсинообразования, показало, что *A. tenuissima*, независимо от источника выделения, на солодовом агаре активно продуцирует АОЛ (от 16 до 287 мкг/г) (табл. 2). У изолятов *A. arborescens* и *A. alternata* на агаре V-8 накопление АОЛ было гораздо меньшим – 0,02 и 1,50 мкг/г.

Таблица 2 – **Продуцирование альтернариола (АОЛ) изолятами *A. tenuissima* из листьев и стеблей сорго-суданкового гибрида Нутритоп Стар на солодовом агаре (7 сут, 25 ºС, без освещения) /**
Table 2 – **Production of alternariol (AOL) by *A. tenuissima* isolates from leaves and stems of the 'Nutritop Star' sorghum-sudangrass hybrid on malt agar (7 days, 25 °C, no light)**

Источник выделения, n / Origin of isolates, n	*n^+/ количество АОЛ (мин.–средн.–макс., мкг/г) / n^+/ amount of AOL (min.–avg.–max., μg/g)*
Листья, *n* = 11 / Leaves, *n* = 11*	11 / 16–79–287
Стебли, *n* = 7 / Stems, *n* = 7**	7 / 19–52–104

Примечания: *n* – число изолятов; n^+ – число продуцентов; * отбор в фазы «кущение» и «выход в трубку»; ** отбор в фазу «выход в трубку» /

Notes: *n* is the number of isolates; n^+ is the number of positive producers; * collecting during "tillering" and "stem elongation" phases; ** collecting during "stem elongation" phase

[1]СТО 00494143.01-2015. Тест-системы для непрямого конкурентного иммуноферментного анализа. Общие технические условия. М.: ВНИИВСГЭ, 2015.

В ходе иммуноферментного анализа в листьях (кущение, выход в трубку) и стеблях растения фузариотоксины Т-2, ДОН, ДАС, ЗЕН, ФУМ, а также ЦИТ, СТЕ, PR и РОА не обнаружены.

В период кущения в листьях были выявлены АОЛ, ЭМО, ОА, ЦПК, ЭА, а также малые количества $АВ_1$ вблизи предела определения и в одном образце – МФК. В листьях в начале фазы «выход в трубку» (8.07) концентрации АОЛ, ЭМО и ОА соответствовали найденным ранее в фазу кущения, ситуация по $АВ_1$ и МФК оставалась прежней, а количества ЦПК и ЭА обнаружены частично из-за сниженных содержаний. При следующем сборе (15.07) во всех образцах листьев присутствовали все компоненты, включая $АВ_1$ и МФК. В стеблевых частях от обоих сборов случаи обнаружения ЦПК, ЭА и ЭМО были единичными (табл. 3).

В течение продолжительной фазы «выход в трубку» было выполнено 5 отборов, присутствие АОЛ, ЭМО и МФК в листьях отмечено устойчивым – их находили во всех образцах – 16–21, 42–78 и 24–54 мкг/кг соответственно (табл. 4). Обнаружение $АВ_1$ было частичным в количествах, близких пределу определения метода, ОА из-за низких концентраций в трех сборах удалось детектировать только в части образцов. Содержания ЦПК и ЭА варьировали по датам сбора, что указывало на вовлеченность продуцирующих их эндофитов в реакции организма на изменения внутренних или внешних факторов. В 17 образцах стеблевых частей растения аналиты отсутствовали.

Таблица 3 – **Встречаемость (n^+) и содержание микотоксинов (мин.–средн.–макс.) в листьях и стеблях сорго-суданкового гибрида Нутритоп Стар по датам отбора /**
Table 3 – **Occurrence (n^+) and content of mycotoxins (min.–avg.–max.) in leaves and stems of 'Nutritop Star' sorghum-sudangrass hybrid by collection dates**

Микотоксин / Mycotoxin		*Фаза «кущение» / "Tillering" phase*			*Начало фазы «выход в трубку» / The beginning of "stem elongation" phase*			
		26.06	*1.07*		*8.07*		*15.07*	
		листья, n = 3 / leaves, n = 3	*листья, n = 3 / leaves, n = 3*		*листья, n = 4 / leaves, n = 4*	*стебли, n = 3 / stems, n = 3*	*листья, n = 5 / leaves, n = 5*	*стебли, n = 2 / stems, n = 2*
Альтернариол / Alternariol	n^+	3	3		4	-	5	-
	мкг/кг / µg/kg	28–29–30	20–20–21		19–21–24	-	14–18–21	-
Охратоксин А / Ochratoxin A	n^+	3	3		4	-	4	-
	мкг/кг / µg/kg	8–9–10	8–11–12		9–11–12	-	8–9–10	-
Афлатоксин B_1 / Aflatoxin B_1	n^+	3	1		2	-	5	-
	мкг/кг / µg/kg	4–4–4	3		3, 3	-	4–4–5	-
Циклопиазоновая кислота / Cyclopiazonic acid	n^+	3	3		2	1	5	1
	мкг/кг / µg/kg	89–112–123	89–111–129		83, 126	81	83–118–140	79
Микофеноловая кислота / Mycophenolic acid	n^+	-	1		1	-	5	-
	мкг/кг / µg/kg	-	19		21	-	19–24–31	-
Эргоалкалоиды / Ergot alkaloids	n^+	3	3		1	-	5	2
	мкг/кг / µg/kg	20–25–32	8–15–19		19	-	13–14–15	5, 9
Эмодин / Emodin	n^+	3	3		3	-	5	2
	мкг/кг / µg/kg	36–41–48	32–35–40		32–43–62	-	38–57–63	38, 49

Примечания: *n* – число исследованных образцов; n^+ – число образцов, содержащих микотоксин; для таблиц 3, 4 /
Notes: *n* is the number of samples examined; n^+ is the number of samples containing mycotoxin; for tables 3 and 4.

Таблица 4 – **Встречаемость (n^+) и содержание микотоксинов (мин.–средн.–макс.) в листьях сорго-суданкового гибрида Нутритоп Стар (фаза «выход в трубку») по датам отбора**
Table 4 – **Occurrence (n^+) and content of mycotoxins (min.–avg.–max.) in leaves of 'Nutritop Star' sorghum-sudangrass hybrid ("stem elongation" phase) by collection dates**

Микотоксин / Mycotoxin		23.07, $n = 5$	30.07, $n = 5$	5.08, $n = 5$	12.08, $n = 6$	30.08, $n = 5$
Альтернариол / Alternariol	n^+	5	5	5	6	5
	мкг/кг / µg/kg	16–21–24	13–16–18	20–21–24	18–21–25	16–17–19
Охратоксин А / Ochratoxin A	n^+	5	3	3	6	3
	мкг/кг / µg/kg	7–9–11	8–9–10	8–8–8	7–9–10	6–7–8
Афлатоксин B_1 / Aflatoxin B_1	n^+	2	2	1	4	4
	мкг/кг / µg/kg	5, 5	5, 5	3	3–4–5	4–5–5
Циклопиазоновая кислота / Cyclopiazonic acid	n^+	5	4	1	4	4
	мкг/кг / µg/kg	53–78–95	50–58–71	59	76–93–100	50–75–100
Микофеноловая кислота / Mycophenolic acid	n^+	4	5	5	6	5
	мкг/кг / µg/kg	47–52–64	38–43–50	20–24–26	26–45–63	40–56–63
Эргоалкалоиды / Ergot alkaloids	n^+	5	5	2	4	5
	мкг/кг / µg/kg	7–12–17	5–7–8	7, 7	14–27–38	6–8–11
Эмодин / Emodin	n^+	5	5	5	6	5
	мкг/кг / µg/kg	51–78–95	40–57–79	34–42–54	52–57–63	45–55–63

На протяжении всего вегетационного периода присутствие АОЛ и ЭМО в зеленой массе растения было постоянным и удерживалось на низком уровне десятков мкг/кг. Источником контаминации АОЛ вполне может быть вид *A. tenuissima*, который в условиях эндофитного обитания не реализует высокий потенциал продуцирования, выявленный *in vitro*. Таксономический статус грибов, причастных к появлению в растении ЭМО, а также МФК, ЦПК, ЭА, ОА и AB_1 пока остается неясным. Ни один из анализированных фузариотоксинов Т-2, ДОН, ДАС, ЗЕН, ФУМ в растении не был найден, хотя доля грибов *Fusarium* в ассоциированном сообществе была весьма существенной.

В целом слабая эндогенная контаминация растения микотоксинами была близка найденной у вегетирующей кукурузы и лишь немного отличалась от ее «физиологической нормы» [7]. Учитывая это сходство, можно предполагать участие микромицетов родов *Alternaria*, *Penicillium* и *Aspergillus* [15, 16, 17]. Состав эндофитов у гибридов с генной модификацией остается неизвестным, доступна только информация по сорго двуцветному (*Sorghum bicolor*). В коммерческих сортах описаны таксоны *Alternaria* и *Cladosporium*, *Fusarium*, *Phoma*, *Cryptococcus*, *Mucor*, *Colletotrichum*, *Epicoccum*, *Talaromyces*, *Acremonium* [18, 19]. Сообщено об идентификации в этих растениях двух видов – *F. thapsinum* и *F. oxysporum* [19, 20], а также нескольких представителей *Fusarium fujikuroi* species complex (в основном *F. thapsinum*), *Fusarium oxysporum* species complex (чаще других – *F. cili*) и генотипов *Fusarium chlamydosporum* species complex и *Fusarium incarnatum-equiseti* species complex [21].

Грибы *Alternaria, Colletotrichum* и *Fusarium* известны как патогены сорго и найдены в тканях с симптомами пятнистости листьев и стеблевой гнили [22, 23]. Гибриды, полученные с помощью генных технологий «*brown-midrib*», отличаются повышенным содержанием в тканях ароматических фенолкарбоновых кислот из состава лигнина, которые

способны ингибировать рост патогенов [24]. Вполне возможно, что изменения в комплексе биологически активных веществ этих растений могут приводить к своеобразию состава сообщества эндофитных грибов.

Заключение. Вегетирующие растения сорго-суданкового гибрида Нутритоп Стар контаминированы комплексом микотоксинов, в котором представлены циклопиазоновая кислота в концентрациях 50–140 мкг/кг, эмодин – 32–95, микофеноловая кислота – 1 9–64, альтернариол –13–30, охратоксин А – 6–12, эргоалкалоиды – 5–38 и афлатоксин B_1 – 3–5 мкг/кг. Фузариотоксины (Т-2 токсин, дезоксиниваленол, диацетоксисцирпенол, зеараленон, фумонозины группы В), цитринин, стеригматоцистин, PR-токсин и роридин А не обнаружены. В листьях на отдельных этапах вегетации выявлено варьирование содержания циклопиазоновой кислоты и эргоалкалоидов. В стеблевой части растений только в единичных случаях в начале фазы «выход в трубку» выявлены циклопиазоновая кислота, эргоалкалоиды и эмодин. По составу и содержанию контаминантов для данного сорта гибрида установлены признаки сходства с зеленой массы кукурузы. Расширение числа кормовых культур, для которых определена «физиологическая норма» по содержанию микотоксинов, позволяет принимать обоснованные решения по направленности возможных эффектов от воздействия антропогенных и биотических факторов при хозяйственном использовании.

References

1. Larran S., Perello´ A., Simo´ M.R., Moreno V. Isolation and analysis of endophytic microorganisms in wheat (*Triticum aestivum* L.) leaves. World Journal of Microbiology & Biotechnology. 2002;18(7):683–686. DOI: https://doi.org/10.1023/A:1016857917950

2. Bhagyasree S. N., Ghosh S. K., Thippaiah M., Rajgopal N. N. Survey on natural occurrence of endophytes in maize (*Zea mays* L.) ecosystem. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2018;7(1):2526–2533. DOI: https://doi/org/10.20546/ijcmas.2018.701.303

3. Berthiller F., Crews C., Dall'Asta C., De Saeger S., Haesaert G., Karlovsky P. et al. Masked mycotoxins: a review. Molecular Nutrition & Food Research. 2013;57(1):165–186. DOI: https://doi.org/10.1002/mnfr.201100764

4. Zang Z., Nie D., Fan K., Yang J., Guo W., Meng J. et al. A systematic review of plant-conjugates masked mycotoxins: Occurrence, toxicology, and metabolism. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2020;60(9):1523–1537. DOI: https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1578944

5. Кононенко Г. П., Зотова Е. В., Буркин А. А. Опыт микотоксикологического обследования зернофуражных культур. Сельскохозяйственная биология. 2021;56(5):958–967. DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.5.958rus EDN: LFQLCC

Kononenko G. P., Zotova Ye. V., Burkin A. A. Advances in mycotoxicological research of forage grain crops. *Selskokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2021;56(5):958–967. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.5.958rus

6. Буркин А. А., Кононенко Г. П., Воловик В. Т., Сергеева С. Е. Комплекс микотоксинов у рапса и сурепицы в весенне-летний период. Сельскохозяйственная биология. 2022;57(5):992–1000. DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.5.992rus EDN: HVCFCA

Burkin A. A., Kononenko G. P., Volovik V. T., Sergeyeva S. Ye. The complex of mycotoxins in oilseed rape and turnip rape during spring and summer seasons. *Selskokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2022;57(5):992–1000. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.5.992rus

7. Кононенко Г. П., Васильков П. Ф., Буркин А. А., Мосина Л. В. Микотоксины в вегетирующих растениях кукурузы с экспериментального монопосева. Российская сельскохозяйственная наука. 2024;(2):59–62. DOI: https://doi.org/10.31857/S2500262724020119 EDN: GSLDSM

Kononenko G. P., Vasilkov P. F., Burkin A. A., Mosina L. V. Mycotoxins in vegetating corn plants from experimental mono-sowing. *Rossiyskaya selskokhozyaystvennaya nauka*. 2024;(2):59–62. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.31857/S2500262724020119

8. Кибальник О. П., Эльконин Л. А., Кожемякин В. В. Хозяйственная ценность сорго-суданковых и суданко-сорговых гибридов F1. Кормопроизводство. 2011;(3):27–28.

Kibalnik O. P., Elkonin L. A., Kozhemyakin V. V. Ecoonomic value of sorghum-sudan grass and sudan grass-sorghum F1 hybrids. *Kormoproizvodstvo* = Forage Production. 2011;(3):27–28. (In Russ.).

9. Ковтунова Н. А., Ковтунов В. В., Романюкин А. Е., Ермолина Г. М. Урожайность сорго травянистого в зависимости от метеорологических условий. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022;23(3):334–342. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.3.334-342 EDN: IZMXUW

Kovtunova N. A., Kovtunov V. V., Romanyukin A. E., Ermolina G. A. Sudan grass productivity depending on meteorological conditions. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2022;23(3):334–342. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.3.334-342

10. Васькина Т. И., Дронов А. В., Бельченко С. А., Дьяченко В. В., Сычев С. М. Оптимизация элементов возделывания сорго кормового на юго-западе Центрального региона России. Аграрная наука. 2022;(9):131–136. DOI: https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-362-9-131-136 EDN: COJWHE

Vaskina T. I., Dronov A. V., Belchenko S. A., Dyachenko V. V., Sychev S. M. Optimization of elements of forage sorghum cultivation in the south-west of the Central region of Russia. *Agrarnaya nauka* = Agrarian science. 2022;(9):131-136. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-362-9-131-136

11. Шкодина Е. П., Балун О. В. Потенциал сорговых культур при выращивании на корм в Нечернозёмной зоне. Пермский аграрный вестник. 2022;4(40):45–52. DOI: https://doi.org/10.47737/2307-2873_2022_40_45 EDN: QLMENJ

Shkodina E. P., Balun O. V. The potential of sorghum crops when grown for feed in the Non-chernozem zone. *Permsky agrarny vestnik* = Perm Agrarian Journal. 2022;4(40):45–52. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.47737/2307-2873_2022_40_45

12. Li J., Wang L., Zhang Q., Liu Y. Map-based cloning and expression analysis of BMR-6 in sorghum. Journal of Genetics. 2015;94(3):445–452. DOI: https://doi.org/10.1007/s12041-015-0550-9

13. Giantin S., Franzin A., Brusa F., Montemurro V., Bozzetta E., Caprai E. et al. Overview of cyanide poisoning in cattle from *Sorghum halepense* and *S. bicolor* cultivars in Northwest Italy. Animals. 2024;14(5):743.
DOI: https://doi.org/10.3390/ani14050743

14. Simmons E. G. *Alternaria*: an identification manual. Biodiversity, Utrecht: CBS, 2007. Vol. 6. 775 p.

15. Fisher P. J., Petrini O., Lapin Scott H. M. The distribution of some fungal and bacterial endophytes in maize (*Zea mays* L.). New Phytologist. 1992;122(2):299–305.
DOI: https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1992.tb04234.x

16. Potshangbam M., Devi S. I., Sahoo D., Strobel G. A. Functional characterization of endophytic fungal community associated with *Oryza sativa* L. and *Zea mays* L. Frontiers in Microbiology. 2017;8:325.
DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00325

17. El-hawary S. S., Moawad A. S., Bahr H. S., Abdelmohsen U. R., Mohammed R. Natural product diversity from the endophytic fungi of the genus *Aspergillus*. RSC Advances. 2020;10:22058–22079.
DOI: https://doi.org/10.1039/D0RA04290K

18. Pambuka G. T., Kinge T. R., Ghosh S., Cason E. D., Nyaga M. M., Gryzenhout M. Baseline data of the fungal phytobiome of three sorghum (*Sorghum bicolor*) cultivars in South Africa using targeted environmental sequencing. Journal of Fungi. 2021;7(11):1–21. DOI: https://doi.org/10.3390/jof7110978

19. Silva R. M. F., Neto W. P. P., Oliveira R. J. V., Bezerra J. D. P., Bezerra J. L., de Lima V. X. et al. Effect of climate and phenological stage on fungal endophytes community in *Sorghum bicolor* leaves. Mycological Progress. 2023;22:19. DOI: https://doi.org/10.1007/s11557-023-01870-z

20. Thio G. I., Zida E. P., Neya J. B., Wulff E. G., Lund O. S., Boelt B. Genetic diversity of *Fusarium* endophytes strains from sorghum (*Sorghum bicolor* L.) tissues in Burkina Faso. International Journal of Biotechnology and Molecular Biology Research. 2021;11(1):1–9. DOI: https://doi.org/10.5897/IJBMBR2021.0316

21. Gunasinghe N., Vaghefi N., Shivas R. G., Tan Y. P., Jordan D., Mace E., Martin A. Diversity and pathogenicity of *Fusarium* spp. isolated from cultivated sorghum stems and roots in eastern Australia. Plant Pathology. 2024;73(9):2563-2573. DOI: https://doi.org/10.1111/ppa.13985

22. Wei G., Zhao W., Hu A., Ren M., Huang Y., Xu H. Identification of a new pathogenic fungi causing sorghum leaf spot disease and its management using natural product and microorganisms. Microorganisms. 2023;11(6):1431. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms11061431

23. Yu Z.-F., Kami Y. B., Xia J.-Y., Chang X.-Y., Li J.-Y., Han J.-R. et al. Identifcation of major fungal diseases in sorghum and screening of broad-spectrum resistance germplasms in Southwest China. Physiological and Molecular Plant Pathology. 2025;138:102706. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2025.102706

24. Funnell-Harris D. L., Sattler S. E., Pedersen J. F. Response of *Fusarium thapsinum* to sorghum *brown midrib* lines and to phenolic metabolites. Plant Disease. 2014;98(10):1300–1308.
DOI: https://doi.org/10.1094/PDIS-09-13-0980-RE

Вклад авторов: Кононенко Г. П. – концепция и план исследования, анализ данных, подготовка рукописи. Буркин А. А., Пирязева Е. А. – выполнение экспериментов, анализ данных. Зотова Е. В. – выполнение экспериментов, подготовка рукописи.

Сведения об авторах

✉ **Кононенко Галина Пантелеевна**, доктор биол. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории микотоксикологии и санитарии кормов, Всероссийский научно-исследовательский институт ветеринарной санитарии, гигиены и экологии – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной ветеринарии имени К. И. Скрябина и Я. Р. Коваленко Российской академии наук», Звенигородское шоссе, д. 5, стр. 1, г. Москва, Российская Федерация, 123022, e-mail: vniivshe@mail.ru, **ORCID: https://orcid/0000-0002-9144-615X**, e-mail: kononenkogp@mail.ru

Буркин Алексей Анатольевич, кандидат мед. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории микотоксикологии и санитарии кормов, Всероссийский научно-исследовательский институт ветеринарной санитарии, гигиены и экологии – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной ветеринарии имени К. И. Скрябина и Я. Р. Коваленко Российской академии наук», Звенигородское шоссе, д. 5, стр. 1, г. Москва, Российская Федерация, 123022, e-mail: vniivshe@mail.ru, **ORCID: https://orcid/0000-0002-5674-2818**

Зотова Елена Владимировна, кандидат вет. наук, старший научный сотрудник лаборатории микотоксикологии и санитарии кормов, Всероссийский научно-исследовательский институт ветеринарной санитарии, гигиены и экологии – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной ветеринарии имени К. И. Скрябина и Я. Р. Коваленко Российской академии наук», Звенигородское шоссе, д. 5, стр. 1, г. Москва, Российская Федерация, 123022, e-mail: vniivshe@mail.ru, **ORCID: https://orcid/0000-0002-1479-8602**

Пирязева Елена Алексеевна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории микотоксикологии и санитарии кормов, Всероссийский научно-исследовательский институт ветеринарной санитарии, гигиены и экологии – филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной ветеринарии имени К. И. Скрябина и Я. Р. Коваленко Российской академии наук», Звенигородское шоссе, д. 5, стр. 1, г. Москва, Российская Федерация, 123022, e-mail: vniivshe@mail.ru, **ORCID: https://orcid/0000-0001-5443-3213**

Author contributions: Kononenko G. P. – research concept and plan, data analysis, manuscript preparation. Burkin A. A., Piryazeva E. A. – conducting experiments, data analysis. Zotova E. V. – conducting experiments, preparation of the manuscript.

Information about authors

✉ **Galina P. Kononenko,** DSc in Biological Science, professor, chief researcher, the Laboratory of Mycotoxicology and Feed Sanitation, All-Russian Research Institute for Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology – branch of Federal Scientific Centre VIEV, Zvenigorodskoye shosse, 5, building 1, Moscow, Russian Federation, 123022, e-mail: vniivshe@mail.ru, **ORCID: https://orcid/0000-0002-9144-615X**, e-mail: kononenkogp@mail.ru

Aleksey A. Burkin, PhD in Medical Science, leading researcher, the Laboratory of Mycotoxicology and Feed Sanitation, All-Russian Research Institute for Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology – branch of Federal Scientific Centre VIEV, Zvenigorodskoye shosse, 5, building 1, Moscow, Russian Federation, 123022, e-mail: vniivshe@mail.ru, **ORCID: https://orcid/0000-0002-5674-2818**

Elena V. Zotova, PhD in Veterinary Science, senior researcher, the Laboratory of Mycotoxicology and Feed Sanitation, All-Russian Research Institute for Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology – branch of Federal Scientific Centre VIEV, Zvenigorodskoye shosse, 5, building 1, Moscow, Russian Federation, 123022, e-mail: vniivshe@mail.ru, **ORCID: https://orcid/0000-0002-1479-8602**

Elena A. Piryazeva, PhD in Biological Science, senior researcher, the Laboratory of Mycotoxicology and Feed Sanitation, All-Russian Research Institute for Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology – branch of Federal Scientific Centre VIEV, Zvenigorodskoye shosse, 5, building 1, Moscow, Russian Federation, 123022, e-mail: vniivshe@mail.ru, **ORCID: https://orcid/0000-0001-5443-3213**

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.368–379
УДК 632.51 (470.311)

Видовой состав сегетальной растительности в агрофитоценозах юго-востока Московской области

© 2026. А. Г. Куклина ✉, А. Н. Швецов
ФГБУН Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

Цель исследования – выявить комплекс сегетальных видов растений на полях сельскохозяйственных культур. Обследованная территория расположена в бассейне р. Осетр и его притоков Осетрик, Уница в муниципальном округе Зарайск на юго-востоке Московской области. Исследование проводили в 2023–2025 гг. маршрутным методом на учетных площадках размером 100 м². Частоту встречаемости сорных видов определяли по 5-балльной шкале. Обследованы агрофитоценозы озимой пшеницы (Triticum aestivum* L.*), озимой тритикале (×Triticosecale rimpaui* Wittm. ex A. Camus*), кукурузы (Zea mays* L.*), сои (Glycine max* (L.) Merr.*), гороха посевного (Pisum sativum* L.*), озимого и ярового рапса (Brassica napus* L.*). Зафиксировано 90 сорных видов сосудистых растений, относящихся к 24 семействам. Среди семейств по числу сегетальных видов лидирует Poaceae (19 видов). Выявлено 50 однолетних видов, из них наиболее часто встречаются Capsella bursa-pastoris, Chenopodium album, Matricaria perforata и Consolida regalis. Отмечено 40 многолетних видов, среди которых в посевах превалируют Convolvulus arvensis, Cirsium arvense, Equisetum arvense, Taraxacum officinale и Sonchus arvensis. На краях полей наблюдали представителей инвазионной флоры: Conyza canadensis, Heracleum sosnowskyi, Epilobium adenocaulon и Amaranthus retroflexus. Среди потенциально инвазионных таксонов в посевах сои выявлен Arrhenatherum elatius; в других агроценозах часто расселяется Veronica persica. При проведении полезащитных мероприятий следует особое внимание обратить на отмеченные факты.

Ключевые слова: *сорные виды растений, агрофитоценоз, Зарайск, Московская область*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБУН Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина Российской академии наук (проект №122042700002-6 «Биологическое разнообразие природной и культурной флоры: фундаментальные и прикладные вопросы изучения и сохранения»).

Авторы благодарны М. Б. Голдовской за транспортные услуги при обследовании удаленных территорий.

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Куклина А. Г., Швецов А. Н. Видовой состав сегетальной растительности в агрофитоценозах юго-востока Московской области. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):368–379.
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.368-379

Поступила: 10.09.2025
Доработана после рецензирования: 04.12.2025
Принята к публикации: 08.04.2026
Опубликована онлайн: 27.04.2026

Species composition of segetal vegetation in agrophytocenoses in the south-east of Moscow region

© 2026. Alla G. Kuklina ✉, Alexander N. Shvetsov
Main Botanical Garden named after N. V. Tsitsin of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

The purpose of the study is to identify a complex of segetal plant species in the fields of agricultural crops. The surveyed area is located in the basin of the Osetr river and its tributaries the Osetrik and the Unitza in the Zaraysk municipal district in the south-east of Moscow region. The research was conducted in 2023–2025 using the route method on the discount areas of 100 m². The frequency of occurrence of weed species was determined on a 5-point scale. There were studied agrophytocenoses of winter wheat (Triticum aestivum* L.*), winter triticale (×Triticosecale rimpaui* Wittm. ex A. Camus*), maize (Zea mays* L.*), soybean (Glycine max* (L.) Merr.*), field pea (Pisum sativum* L.*), and winter and spring rapeseed (Brassica napus* L.*). Ninety weed species of vascular plants belonging to 24 families have been identified. Among the families, Poaceae has the highest number of segetal species (19 species). There are 50 annual species, with Capsella bursa-pastoris, Chenopodium album, Matricaria perforata, and Consolida regalis being the most common. There are 40 perennial species, with Convolvulus arvensis, Cirsium arvense, Equisetum arvense, Taraxacum officinale, and Sonchus arvensis being the most prevalent in crops. Representatives of invasive flora have been noted at the edges of the fields, they are Conyza canadensis, Heracleum sosnowskyi, Epilobium adenocaulon and Amaranthus

retroflexus. Arrhenatherum elatius has been identified as a potentially invasive taxon in soybean crops, while Veronica persica is often found in other agrocenoses. These facts should be taken into account when conducting field protection measures.

Keywords: *weed species, agrophytocenosis, Zaraysk, Moscow region*

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Main Botanical Garden named after N. V. Tsitsin of the Russian Academy of Sciences (project No. 122042700002-6 «Biological Diversity of Natural and Cultural Flora: Fundamental and Applied Issues of Study and Conservation»).

The authors are grateful to M. B. Goldovskaya for the transportation services necessary for the survey of remote areas.
The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interests: the authors stated that there was no conflict of interest.

For citation*:* Kuklina A. G., Shvetsov A. N. Species composition of segetal vegetation in agrophytocenoses in the south-east of Moscow Region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):368–379. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.368-379

Received: 10.09.2025
Revised: 04.12.2025
Accepted for publication: 08.04.2026
Published online: 27.04.2026

Состав, характер распространения и обилие видов сорной растительности зависят не только от сформировавшихся в климатических условиях определенного региона флористических комплексов, но и от соблюдения системы землепользования, правил агротехники, своевременного применения средств защиты растений. Исследователи отмечают, что сегетальная растительность качественно неоднородна, она может также включать растения, встречающиеся в рудеральных и естественных местообитаниях [1]. Такое явление авторы наблюдали при обследовании полевых ценозов бассейна р. Осетр на юго-востоке Московской области [2, 3].

В 1914 г. в Московской губернии в крестьянских посевах ржи, овса, льна и картофеля было отмечено 120 видов сорных растений [4]. Ведущее место среди них занимали *Bromus secalinus* L., *Cerastium fontanum* Baumg., *Spergula arvensis* L., *Scleranthus annuus* L. и другие. Трудно искореняемыми видами значились *Achillea millefolium* L., *Glechoma hederacea* L., *Equisetum arvense* L., *Elytrigia repens* (L.) Nevski, *Cirsium arvense* (L.) Scop. и *Convolvulus arvensis* L. В середине 1930-х годов наиболее часто в посевах озимых культур встречалось около 30 видов растений, хотя позже их обилие уменьшилось, но ущерб, наносимый сельскохозяйственным культурам, практически не изменился. Среди сорных растений упомянуты *Equisetum arvense*, *Elytrigia repens*, *Cirsium arvense* и *Convolvulus arvensis.* В 1980 г. в списке сорных растений на полях Московской области указано 160 видов [5]. В тот период к наиболее распространенным отнесено 20 видов: *Atriplex patula* L., *Stellaria media* (L.) Vill., *Gnaphalium sylvaticum* L., *Matricaria perforata* Mérat, *Centaurea cyanus* L. и некоторые другие. Указывается, что в посевах полевых культур обилие названных сорняков заметно снизилось и практически исчезли *Bromus secalinus, B. arvensis* L., *Glechoma hederacea*, *Brassica campestris* L., *Agrostemma githago* L., *Cichorium intybus* L., *Rhinanthus Alectorolophus* (Scop.) Poll., *Tanacetum vulgare* L., *Plantago major* L., *Trifolium arvense* L., *Berteroa incana* (L.) DC., *Rumex crispus* L. и др. [5]. Но, одновременно, зафиксирован ряд таких теплолюбивых растений, как *Amaranthus reflexus* L., *Echinochloa crusgalii* (L.) P. Beauv. и *Setaria viridis* (L.) P. Beauv. s.l., продвигающихся на север [6].

Мониторинг состава и обилия сорных растений, характера их распространения, кроме прикладных целей, представляет значительный научный интерес, особенно в связи с изменениями климата и структурными совершенствованиями в характере землепользования. Это способствует разработке защитных мер при возделывании агрокультур и имеет важное значение для успешной сельскохозяйственной деятельности [7, 8].

Цель исследования – выявить сегетальные виды растений на полях сельскохозяйственных культур в юго-восточной части Московской области. В задачи данной работы входило обследование агрофитоценозов в муниципальном округе Зарайск, составление и анализ списка видов сорных растений, определение степени засоренности агропосевов и нахождение видов чужеродной флоры. Обследование относительно небольших по площади территорий (административный район) позволяет более четко проследить влияние природных особенностей территории и хозяйственных факторов на состав и динамику изменений сорной флоры.

Научная новизна – выявление наиболее распространенных сорных видов растений и анализ степени участия опасных инвазионных

растений в агропосевах на юго-востоке Московской области.

Материал и методы. Объектами обследования послужили агрофитоценозы муниципального округа (далее м. о.) Зарайск, находящегося на северо-востоке Среднерусской возвышенности. Основная территория изучения размещена в бассейне р. Осетр притока р. Ока. Регион занимает площадь 96 тыс. га и расположен на юго-востоке Московской области. Под пашню в м. о. Зарайск занято более 60 % площадей – до 48 тыс. га. В структуре посевных полей на 2025 г. отведена территория 30 тыс. га под зерновые и зернобобовые культуры, включающие озимую пшеницу, кукурузу и горох. Более 13 тыс. га засеяно масличными культурами, рапсом и соей[1].

В почвенном покрове региона к водоразделам приурочены серые лесные почвы; в долине р. Осетр сформированы аллювиальные почвы, в центральной части поймы распространены глинистые и суглинистые почвы с выраженным гумусовым горизонтом.

Исследование сорного компонента проведено в 2023–2025 гг. в агрофитоценозах с озимой пшеницей (*Triticum aestivum* L.), озимой тритикале (×*Triticosecale rimpaui* Wittm. ex A. Camus), кукурузой (*Zea mays* L.), соей (*Glycine max* (L.) Merr.), горохом (*Pisum sativum* L.) и рапсом (*Brassica napus* L.) (табл. 1).

Таблица 1 – **Объекты исследования в Московской области /**
Table 1 – **Objects of the research in the Moscow region**

Агрокультура / Crop species	*Период обследования / Survey period*	*Месторасположение в м. о. Зарайск / Location in Zaraysk district*	*Геолокация / Geolocation*
Озимая пшеница / Winter wheat	Июнь – август 2023 г.; Июнь – июль 2025 г. / June – August 2023; June – July 2025	Долина р. Осетрик, д. Новоселки / Valley of the Osetrik river, Novoselki village	54.81364° с. ш.; 38.90013° в. д.
	Июнь – август 2024 г. / June –August 2024	Долина р. Осетр, д. Иванчиково, д. Струпна / Valley of the Osetr river, Ivanchikovo village, Strupna village	54.70916° с. ш.; 38.80833° в. д.
	Июнь – июль 2025 г. / June – July 2025	Долина р. Уница, д. Титово / Valley of the Unitsa river, Titovo village	54.82527° с. ш.; 37.79777° в. д.
Озимая тритикале / Winter triticale	Июнь – июль 2025 г. / June – July 2025	Долина р. Осетр, д. Солопово / Valley of the Osetr river, Solopovo village	55.76722° с. ш.; 38.74944° в. д.
	Июнь – июль 2025 г. / June – July 2025	Западнее д. Мендюкино / West of Mendyukino village	55.77277° с. ш.; 38.79444° в. д.
	Июнь – август 2025 г. / June – August 2025	Долина р. Уница, д. Широбоково / The valley of the Unitsa River, Shirobokovo Village	54.84750° с. ш.; 38.88361° в. д.
Кукуруза / Maize	Июнь – июль 2025 г. / June – July 2025	Долина р. Осетр, д. Аргуново / Valley of the Osetr river, Argunovo village	54.74388° с. ш.; 38.64805° в. д.
	Июнь – июль 2025 г. / June – July 2025	Севернее д. Трасна / North of Trasna village	54.74388° с. ш.; 38.64805° в. д.
Соя / Soy	Июнь – август 2025 г. / June – August 2025	Около д. Дубакино, восточнее СНТ «Флора» / Near Dubakino village, to the east of the «Flora» garden community	54.78250° с. ш.; 38.54444° в. д.
	Июнь – июль 2025 г. / June – July 2025	Долина р. Малая Песочная, д. Дубакино / Valley of the Malaya Pesochnaya river, Dubakino village	54.72527 ° с. ш.; 38.61333° в. д.
Посевной горох / Field Pea	Июнь – июль 2025 г. / June – July 2025	Южнее д. Пронюхлово / South of Pronyukhlyovo Village	54.76777° с. ш.; 38.79361° в. д.
	Июль 2025 г. / July 2025	Южнее д. Солопово / South of Solopovo village	54.76722° с. ш.; 38.74916° в. д.
Озимый рапс / Winter rapeseed	Июнь – июль 2025 г. / June – July 2025	Западнее д. Никольское / West of Nikolskoye village	54.73166° с. ш.; 38.63111° в. д.
Яровой рапс / Spring rapeseed	Июнь – август 2025 г. / June – August 2025	Долина р. Уница, д. Радушино / Valley of the Unitsa river, Radushino village	54.82527° с. ш.; 38.79555° в. д.

[1]Мазепов Е. Новости Московской области (3 апреля 2025 г.). Регионы.РУ. [Электронный ресурс]. URL: https://regions.ru-03 april 2025 (дата обращения: 28.08.2025).

Выявление видового состава осуществляли маршрутным методом, обследовали учетные площадки размером 100 м^2 [9]. Для каждой культуры учитывали не менее 10 площадок, размещенных в срединной части поля и по его краю. К «краю поля» мы относили пограничную территорию (шириной ~1-2 м), не вспаханную в текущем году, но обработанную в предыдущие годы. В данной статье не обсуждали залежные участки, опоясывающие поля, в пределах которых формируются многовидовые сообщества лугового типа из местных региональных видов. Латинские названия флористических таксонов указывали согласно С. К. Черепанову [10]. Степень засоренности агрофитоценозов, характеризующая частоту встречаемости сорных видов, определяли по 5-балльной шкале[2]: 1 балл (очень слабая) – 1–5 растений/м^2; 2 балла (слабая) – 6–15 растений; 3 балла (средняя) –16–50 растений; 4 балла (сильная) – 51–100 растений; 5 баллов (очень сильная) – более 100 сорных растений/м^2.

Результаты и их обсуждение. В обследованных агроценозах на юго-востоке Московской области отмечено 90 видов сосудистых растений (табл. 2), относящихся к 24 семействам.

Таблица 2 – **Частота встречаемости сегетальных видов в различных агроценозах, балл /**
Table 2 – **Frequency of occurrence of segetal species in various agrocenoses, points**

Таксон / Taxon	*Озимая пшеница / Winter wheat*		*Тритикале / Triticale*		*Кукуруза / Maize*		*Соя / Soy*		*Горох / Pea*		*Озимый рапс / Winter rapeseed*		*Яровой рапс / Spring rapeseed*	
	k	z	k	z	k	z	k	z	k	z	k	z	k	z
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Однолетние виды / Annual species														
Amaranthus retroflexus L.[In]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
Apera spica-venty (L.) Beauv.	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-
Arabidopsis thaliana (L.) Heynh.	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Arenaria serpyllifolia L.	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Avena fatua L.	-	-	-	-	-	2	-	-	2		1	-	-	-
Barbarea vulgaris R. Br.	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Brassica napus L.	1	1	1	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Bromus arvensis L.	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	1		-	-
Capsella bursa-pastoris (L.) Medik.	-	1	2	1	2	2	-	-	2	-	2	1	1	-
Centaurea cyanus L.	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cerastium holosteoides Fries	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Chenopodium album L.	1	1	-	-	2	1	4	2	-	-	3	1	1	-
Consolida regalis S.F. Gray	1	-	3	2	2	-	1	-	2	-	2	-	-	-
Conyza canadensis (L.) Cronq. [In]	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Daucus carota L.	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Descurainia sophia (L.) Webb ex Prantl	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Echinochloa crusgalli (L.) Beauv.	-	1	-	-	-	-	4	3	-	-	1	-	-	-
Erodium cicutarium (L.) L' Hér.	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	1	-	-	-
Euphorbia helioscopia L.	3	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fallopia convolvulus (L.) A. Löve	1	-	-	-	3	2	2	-	-	-	3	1	1	-
Fumaria officinalis L.	1	1	3	-	2	1	-	1	1	-	1		-	-
Galeopsis bifida Boenn.	1	2	-	-	1	-	-	-	-	-	1	--	-	-
Galeopsis ladanum L.	3	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

[2]Самсонова В. П., Благовещенский Ю. Н., Кондрашкина М. И. Учет и картографирование сорной растительности. М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2006. 88 с.
URL: https://dl.libcats.org/genesis/199000/222049587c1add97aee228076ee660dc/_as/%5BSamsonova_V.P.,_Blagovesh-ensky_YU.N,_Kondrashkina(libcats.org).pdf

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Galeopsis speciosa Mill.	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Galium spurium L.	1	-	-	-	2	-	-	1	2	-	-	-	-	-
Juncus bufonius L.	1	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lactuca serriola L.	1	1	2	-	2	1	3	-	1	-	-	-	-	-
Lamium amplexicaule L.	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lolium multiflorum Lam.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
Malva pusilla Smith	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	1	-	-	-
Matricaria perforata Mérat	2	1	4	1	2	1	1	-	2	-	3	-	-	-
Myosotis arvensis (L.) Hill	-	-	2	-	2	-	1	-	2	-	-	-	-	-
Neslia paniculata (L.) Desv.	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-
Persicaria lapathifolia (L.) S.F.Gray	2	3	1	-	1	-	-	-	-	-	2	-	-	-
Poa annua L.	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
Polygonum aviculare L.	1	1	-	-	1	1	-	-	-	-	5	2	-	-
Raphanus raphanistrum L.	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Scleranthus annuus L.	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Secale cereale L.	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Setaria pumila (Poir.) Schult.	1	3	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	2	3
Sonchus asper (L.) Hill	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Spergularia rubra (L.) J. et C. Presl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
Stellaria media (L.) Vill.	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-
Thlaspi arvense L.	1	1	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-	1	1
Triticum aestivum L.	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-
Trifolium arvense L.	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Veronica arvensis L.	-	-	-	-	1	-	-	-	2	-	-	-	-	-
Veronica persica Poir.[Pi]	2	-	-	1	3	1	-	-	-	-	1	-	-	-
Veronica polita Fries	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1	1	-	-
Viola arvensis Murr.	1	1	-	2	3	1	-	-	-	1	2	1	1	1
Многолетние виды / Perennial species														
Agrostis gigantea Roth	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Achillea millefolium L.	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Arrhenatherum elatius (L.) J. et C. Presl [Pi]	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-
Artemisia absinthium L.	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Artemisia vulgaris L.	-	-	1	-	1	1	-	-	1	-	-	-	1	-
Bromopsis inermis (Leyss.) Holub	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-
Cichorium intybus L.	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cirsium arvense (L.) Scop.	3	1	1	1	1	2	3	2	3	1	-	-	1	-
Convolvulus arvensis L.	1	1	1	2	-	2	-	2	2	1	3	1	1	-
Dactylis glomerata L.	-	-	-	-	3	-	-	-	1	-	-	-	-	-
Elytrigia repens (L.) Nevski	-	-	2	-	3	-	1	2	2	-	-	-	-	-
Epilobium adenocaulon Hausskn. [In]	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Equisetum arvense L.	3	2	2	2	3	1	-	2	4	2	1	1	1	1
Euphorbia virgata Waldst. et Kit.	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-
Galium mollugo L.	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	-
Glechoma hederacea L.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Heracleum sosnowskyi Manden. [In]	-	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
Linaria vulgaris Mill.	-	-	-	-	1	-	1	1	1	-	1	-	-	-
Lolium perenne L.	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mentha arvensis L.	1	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
Myosoton aquaticum (L.) Moench	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pastinaca sativa L.	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Phleum pratense L.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
Plantago major L.	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Poa compressa L.	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Poa palustris L.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	1
Poa pratensis L.	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
Ranunculus repens L.	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rumex crispus L.	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Silene alba (Mill.) E. Krause	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Silene vulgaris (Moench) Garcke	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
Sonchus arvensis L.	1	1	-	-	1	1	1	2	2	-	-	-	-	-
Stachys palustris L.	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-	-	-
Tanacetum vulgare L.	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Taraxacum officinale Wigg.	-	-	3	1	2	-	1	1	-	-	3	-	-	-
Trifolium pratense L.	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Veronica anagallis-aquatica L.	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Veronica serpyllifolia L.	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vicia cracca L.	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Vicia sepium L.	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Примечания: k – край поля; z – середина поля; In – инвазионный вид; Pi – потенциально инвазионный вид; «-» – сорный вид не встречен /

Notes: k – edge of the field; z – middle of the field; In – invasive species; Pi – potentially invasive species; «-» – a dirty look is not encountered

Среди 24 семейств, включающих сорные виды растений, на юго-востоке Московской области лидирует Poaceae (19 видов), далее по мере убывания числа таксонов следуют Asteraceae (13 видов) > Brassicaceae, Caryophyllaceae (по 8 видов) > Lamiaceae (7 видов) > Scrophulariaceae (6 видов) > Fabaceae, Polygonaceae (по 4 вида) > Apiaceae (3 вида), остальные > по 1-2 вида (рис. 1).

В составе сегетальной флоры, обследованной в агроценозах юго-востока Московской области, отмечено 50 однолетних и 40 многолетних видов растений (рис. 2). Согласно этому анализу, сорные растения, размножающиеся семенами и корневищами, распределены практически поровну, что указывает на необходимость усиления механических и химических способов обработки почвы.

На современном мировом рынке кукуруза (*Zea mays* L.) набирает популярность, благодаря потенциалу полезных свойств. В кукурузе обнаружено более 20 биологически активных фенольных соединений, включая антоцианы и флавоноиды [11]. В Зарайске эта питательная кормовая культура используется в основном на корм сельскохозяйственным животным и птицам, а также для получения зерна. На полях с посевами кукурузы, где предшественником служила озимая пшеница, отмечено 42 сорных вида, что составляет почти половину выявленных в регионе видов сегетальной флоры (рис. 3).

Наиболее засоренными, как у большинства агрокультур, являются края полей, где обильно произрастают однолетние виды: *Fallopia convolvulus, Veronica persica* и *V. arvensis*; многолетние *Dactylis glomerata, Elytrigia repens* и *Equisetum arvense.* В центральных частях полей среди пропашной культуры высокую активность проявляют *Setaria pumila* и корневищные *Cirsium arvense* и *Convolvulus arvensis.*

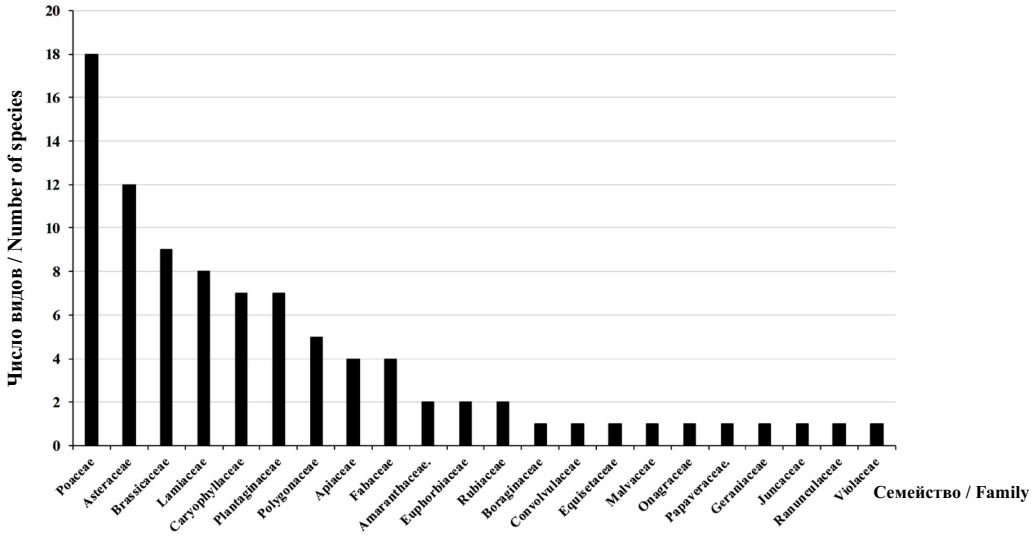


Рис. 1. **Спектр семейств, представляющих сорные виды растений на юго-востоке Московской области /**
Fig. 1. **The spectrum of families representing weed species in the south-east of Moscow region**

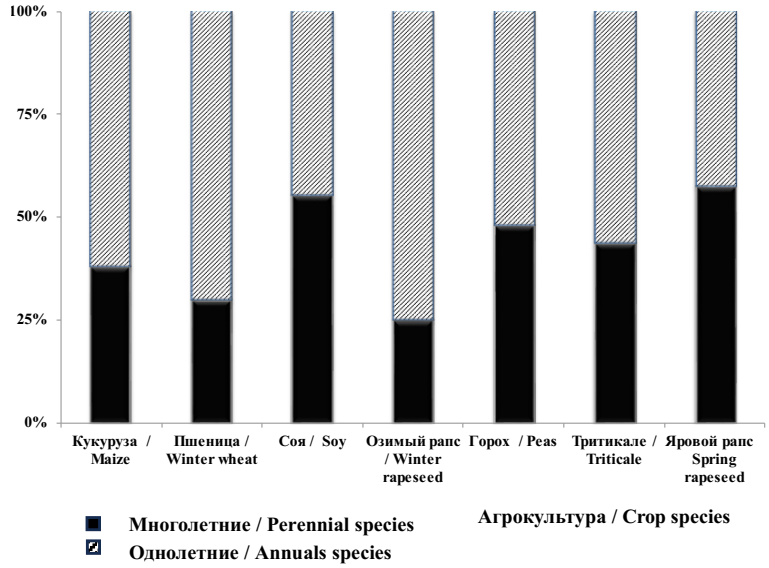


Рис. 2. **Соотношение однолетних и многолетних сорных растений в агроценозах, % /**
Fig. 2. **Ratio of annual and perennial weed plants in agrocenoses, %**

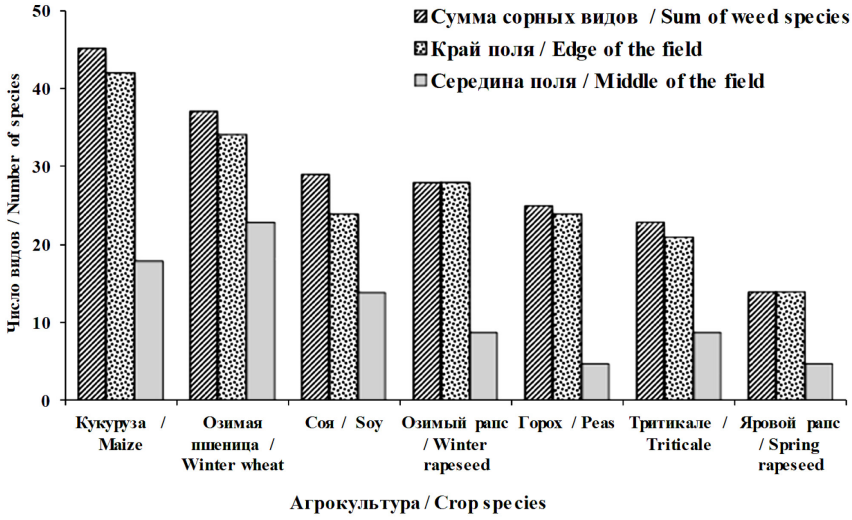


Рис. 3. **Соотношение числа сорных видов по краю и на середине полей с различными агрокультурами /**
Fig. 3. **Ratio of the number of weed species at the edge and in the middle of the fields with different crop species**

На урожайность и устойчивость озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) влияют почвенно-климатические и биоэкологические условия. В период обильных дождей происходит переувлажнение почвы, что приводит к вымоканию и частичной гибели всходов. В зимне-весенний период при низких температурах и отсутствии достаточного снежного покрова может произойти вымерзание посевов [12]. Эта зерновая культура используется в хлебопекарной промышленности, пшеничные отруби применяются в качестве фуража. Предшественником озимой пшеницы на обследованных полях служила яровая зерновая культура. Исследования сорной растительности в посевах озимой пшеницы проводили в разные периоды вегетации культуры (от всходов до выхода в трубку). В агроценозах юго-востока Московской области присутствуют 37 сегетальных видов растений, среди которых на полях с озимой пшеницей обнаружены *Juncus bufonius, Persicaria lapathifolia, Setaria pumila, Galeopsis bifida,* реже *Centaurea cyanus*, *Thlaspi arvense, Sonchus arvensis, Chenopodium album.* Постоянными спутниками на полях пшеницы были *Echinochloa crusgalli* и *Capsella bursa-pastoris*.

На территории м. о. Зарайска высевают озимую тритикале (×*Triticosecale rimpaui*), полученную при скрещивании пшеницы с рожью. Эта культура унаследовала лучшие признаки родительских видов и характеризуется повышенной морозостойкостью, устойчивостью к фитопатогенам. Семена, находящиеся в плотном колосе тритикале, имеют высокое содержание белка, жира, повышенный уровень незаменимых аминокислот, таких как лизин, валин, глицин, аргинин, значительный набор макро- и микроэлементов, низкое количество глютена. Посевы зернофуражной агрокультуры тритикале обладают хорошей урожайностью в различных условиях [13]. В период обследования агрокультура выделялась слабой засоренностью. На полях с гибридной тритикале выявлено 23 сегетальных вида, большинство которых сосредоточены на краю поля. В срединных частях полей единично присутствовали только 9 видов: *Matricaria perforata, Capsella bursa-pastoris, Consolida regalis, Equisetum arvense, Convolvulus arvensis, Taraxacum officinale* и другие.

В России ежегодно возрастает спрос на сою (*Glycine max*), дающую белок и масла, корма и топливо. Соя, как заменитель масла и молока, входит в состав сотни видов продуктов [14]. Более 80 % мировых посевов сои сосредоточено в странах Восточной Азии и Китае. Соя ценится во всем мире как белковая и масличная культура, обогащена антоцианами, изофлавонами и олифенолами, обладающими антиоксидатным потенциалом [15]. Для успешного выращивания сои подходят южные регионы Московской области, включая Зарайск, Луховицы и Серебряные Пруды. Предшественником для сои служила озимая пшеница. В посевах с соей в период всходов выявлено 29 сорных видов: *Echinochloa crusgalli, Chenopodium album, Viola arvensis*, *Fumaria officinalis*, *Galium spurium* L. и пр. Среди потенциально инвазионных таксонов в посевах сои выявлен *Arrhenatherum elatius*. Также в посевах сои (и озимого рапса) встречен европейский вид – *Veronica polita* (вероника глянцевитая), габитуально похожая на потенциально инвазионную *V. persica.*

Проведено обследование полей с горохом посевным (*Pisum sativum* L.), относящимся к пищевой и кормовой культуре. Как многие бобовые растения, он способствует улучшению свойств почвы, насыщая ее азотом [16]. В Зарайске горох является предшественником озимой пшеницы. В агроценозах гороха низкое разнообразие сорных видов – в основном, распространенные корневищные многолетники (см. табл. 2). Кроме того, на полях с горохом в состоянии обильного цветения присутствовали единичные экземпляры *Neslia paniculata* – заносного евроазиатского вида, который в начале XX века часто встречался в посевах овса и льна, но позже попадался лишь на газонах и в рудеральных сообществах [17], отмечается в агропосевах Рязанской области [4]. Как у многих агрокультур, подавляющее большинство сорных видов растений (96 %) находится на краю поля, засеянного горохом (рис. 4).

Рапс (*Brassica napus* L.), в виду нестабильной морозостойкости, лишь недавно стали выращивать в южных регионах Московской области, где более мягкие зимние условия. Сорта озимого рапса менее зимостойки, в сравнении с яровыми, которые хуже переносят недостаток влаги. В качестве экспериментальной культуры с 2018 г. рапс высевают в Зарайске, используя как масличную культуру и для силосования [18]. Предшественниками на полях с рапсом служила озимая пшеница. В конце июня озимый рапс закончил цветение и вступил в фазу плодоношения, сформировав обильную

растительную массу. Посевы рапса характеризовались незначительным числом сорных видов: в яровом – 5, в озимом – 9 видов. Общими для них были – *Equisetum arvense* и *Viola arvensis*. По краям полей с озимым рапсом выявлено 28 видов, но более густые заросли образовал *Polygonum aviculare*, у ярового рапса – 14 видов, где преобладал *Setaria pumila*.

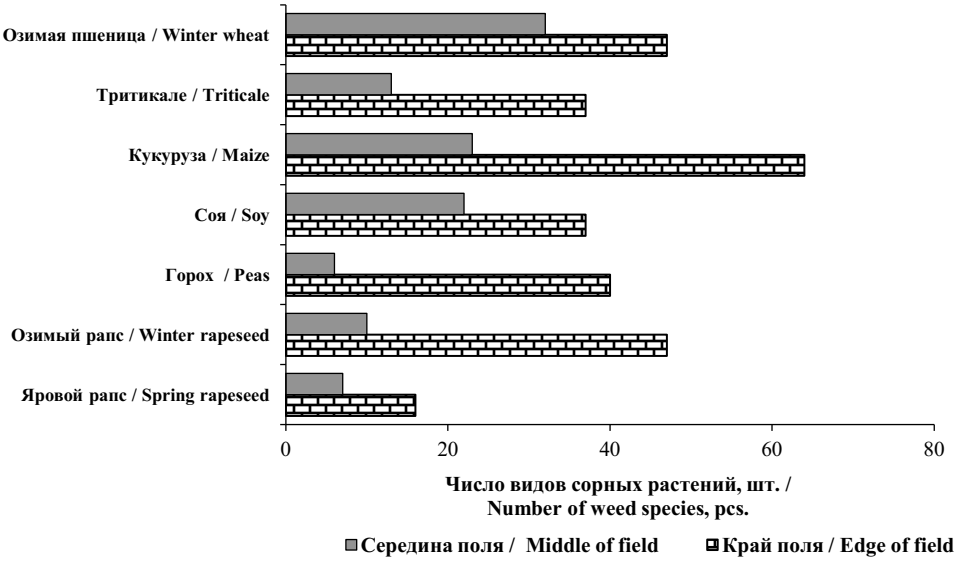


Рис. 4. **Число видов сорных растений в агроценозах, шт. /**
Fig. 4. **Number of weed species in agrocenoses, pcs.**

Различие целей, методов и объема исследований накладывает определенные ограничения на сравнение данных и определение направлений динамики видового состава. Так, по мнению В. В. Никитина [6], *Echinochloa crusgalli* и *Setaria pumila,* появились в Московской области недавно и являются примером экспансии теплолюбивых видов, но, согласно П. А. Смирнову [19], эти виды еще в 1950-е годы были обычными сорными растениями в южных районах Московской области.

Из новых видов следует отметить *Veronica persica,* сведения о которой в Подмосковье относятся к концу XIX века [20], однако в последующие годы в качестве сорного полевого вида она не упоминалась. По нашим данным, *V. persica* распространена довольно широко, отмечена на трети обследованных участков (за исключением посевов сои и гороха). На окраинах полей она имеет высокое обилие. Зафиксированы единичные находки еще одной вероники – *Veronica polita*, которую прежде в посевах не находили. Тенденцию к появлению в сегетальной флоре опасных чужеродных видов отмечают в Рязанской и некоторых других областях [4]. Так, Е. А. Сухолозова [21] для Пензенской области приводит такие карантинные виды, как *Ambrosia trifida* L., *Cuscuta campestris* Yunck., *Cyclachaena xanthiifolia* (Nutt.) Fresen. Из них нами найдена лишь *Cuscuta campestris,* которая росла вблизи поля с озимой пшеницей, но в рудерально-луговом сообществе по краю дороги [2], поэтому в список сегетальных видов не включена. Также среди культур, выращиваемых ранее в м. о. Зарайска, около агропосевов обнаружена *Galega orientalis* Lam. – многолетнее кормовое растение, которое может рассматриваться как инвазионный вид и потенциальный полевой сорняк.

Заключение. Таким образом, на обследованных полях выявлено 90 сосудистых видов растений, произрастающих в агрофитоценозах. Наибольшая встречаемость (половина обследованных участков) отмечена для 10 видов, среди них 7 однолетних (*Capsella bursa-pastoris*, *Chenopodium album, Consolida regalis*, *Fallopia convolvulus, Fumaria officinalis*, *Matricaria perforata, Viola arvensis*) и 3 многолетних (*Convolvulus arvensis, Cirsium arvense, Equisetum arvense*), относящиеся к распространенным сорным растениям Средней России.

Обилие видов сорных растений на обследованных полях в целом невелико, что связано с качеством ухода за посевами. Для узкой краевой зоны полей характерно их увеличение и суммарное проективное покрытие, достигающее 50–70 %. Именно здесь мы фиксировали

обилие таких типичных сегетальных растений, как *Centaurea cyanus* и *Consolida regalis*, в прошлом весьма широко распространенных на полях, но теперь относящихся в некоторых регионах к числу сокращающихся видов. В качестве примеси по краям полей встречается самосев агрокультур предыдущих лет (*Brassica napus*, *Triticum aestivum*).

В обследованном районе среди опасных чужеродных видов присутствуют, в первую очередь по краям полей, уже давно обосновавшиеся в региональной флоре инвазионные виды – *Conyza canadensis*, *Heracleum sosnowskyi*, *Epilobium adenocaulon, Amaranthus retroflexus*, встречаемость которых невелика, но мониторинг за их распространением необходим.

Список литературы

1. Мысник Е. Н., Семенова Н. Н. Оценка степени приуроченности сорных растений к сегетальным местообитаниям. Вестник защиты растений. 2012;(1):68–69.

2. Швецов А. Н., Куклина А. Г., Озерова Н. А. Флористическое обследование ООПТ «Остепненные склоны и балочные леса по правому берегу долины р. Осетрик» (Московская область). Фиторазнообразие Восточной Европы. 2024;18(2):163–193. DOI: https://doi.org/10.24412/2072-8816-2024-18-2-163-193 EDN: HYGZMY

3. Kuklina A. G., Ozerova N. A., Shvetsov A. N., Shaykina M. N., Yolkina E. S. Trends in the Settlement of Invasive Plant Species on the Territory of the Nature Sanctuary «Forested Ravine near the village of Vlasievo» (Moscow Oblast). Russian Journal of Biological Invasions. 2024;15(1):63–72. DOI: https://doi.org/10.1134/S2075111724010089

4. Палкина Т. А. Флористический состав сорного компонента агроценозов на территории Рязанской области. Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2011;(4):44–55. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16972188 EDN: OHKLWP

5. Туляков Д. Г. Сегетальная флора Московской области. Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 1982;(5):46–52.

6. Никитин В. В. Географическое распространение важнейших сорных растений СССР и их динамика. Ботанический журнал. 1979;64(7):943–949.

7. Михайлова С. И., Эбель Т. В., Шереметова С. А., Эбель А. Л. Сорные растения в агроценозах и зернопродукции Кемеровской области. Вестник КрасГАУ. 2022;(6(183)):58–64. DOI: https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-6-58-64 EDN: TKFXQY

8. Бекетова О. А., Иванова Н. В., Жохова Е. А. Особенности видового состава сорной флоры Красноярского природного округа. Вестник КрасГАУ. 2019;(4(145)):10–15. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38510359 EDN: ZYEPXF

9. Лунева Н. Н. Современная методология фитосанитарного мониторинга сорных растений. Защита и карантин растений. 2009;(11):20–24. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12970619 EDN: JVLTTQ

10. Черепанов С. К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и Семья-95, 1995. 992 с. Режим доступа: https://books.google.ru/books?id=jvum0LHrXVMC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false

11. Lao F., Sigurdson G. T., Giusti M. M. Health benefits of purple corn (*Zea mays* L.) phenolic compounds. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2017;16(2):234–246. DOI: https://doi.org/10.1111/1541-4337.12249

12. Роньжина Е. С. Озимая и яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.) в агроклиматических условиях Калининградской области. Известия КГТУ. 2018;(51):100–110. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=vkjzkn EDN: VKJZKN

13. Шишлова Н. Физиолого-биохимические основы продуктивности и качества тритикале. Минск: «Беларуская навука», 2019. 201 с.

14. Ponnusha B. S., Subramaniyam S., Pasupathi P., Subramaniyam B., Virumandy R. Antioxidant and Antimicrobial properties of Glycine Max – A review. International Journal of Current Biological and Medical Science. 2011;1(2):49–62. URL: https://web-archive.southampton.ac.uk/cogprints.org/7323/1/Antioxidant_and_Antimicrobial_properties_of_Glycine_Max-A_review.pdf

15. Anderson E. J., Ali M. L., Beavis W. D., Chen P., Clemente T. E., Diers B. W. et al. Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) breeding: history, improvement, production and future opportunities. Advances in Plant Breeding Strategies: Legumes. 2019;7(12):431–516. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-23400-3_12

16. Донская М. В., Велкова Н. И., Наумкин В. П. Изучение морфобиологических особенностей гороха посевного в совместных посевах с горчицей белой. Зернобобовые и крупяные культуры. 2017;(2(22)):79–83. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29331849 EDN: YRWPCJ

17. Майоров С. Р., Алексеев Ю. Е., Бочкин В. Д., Насимович Ю. А., Щербаков А. В. Чужеродная флора Московского региона: состав, происхождение и пути формирования. М.: Тов-во научн изд КМК, 2020. 576 с.

18. Bouchet A. S., Laperche A., Bissuel-Belaygue C., Snowdon R., Nesi N., Stahl A. Nitrogen use efficiency in rapeseed. A review. Agronomy for Sustainable Development. 2016;36(2):38.
DOI: https://doi.org/10.1007/s13593-016-0371-0

19. Смирнов П. А. Флора Приокско-Террасного государственного заповедника. Труды Приокско-Террасного государственного заповедника. М., 1958. Вып. 2. 246 с.
Режим доступа: https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/Tryd/text.pdf

20. Федченко Б. А. Новые дополнения к флоре Московской губернии. Материалы познания фауны и флоры Российской империи. Отд. ботан. М.: Университетская типогр., 1899. Вып.3. С. 155–172.

21. Сухолозова Е. А. Чужеродные виды растений в посевах пшеницы (Пензенская область). Промышленная ботаника. 2024;24(3):126–132. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.14114294 EDN: KSDTLE

References

1. Misnik E. N., Semenova N. N. Assessment of the degree of correlation of weeds to segetal habitats. *Vestnik zashchiti rasteniy* = Plant Protection News. 2012;(1):68–69. (In Russ.).

2. Shvetsov A. N., Kuklina A. G., Ozerova N. A. Floristic explore of specially protected natural area "The steppe slopes and beams forests on the valley right bank of the Osetrik river" (Moscow region). *Fitoraznoobraziye Vostochnoy Yevropi* = Phytodiversity of Eastern Europe. 2024;18(2):163–193. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24412/2072-8816-2024-18-2-163-193

3. Kuklina A. G., Ozerova N. A., Shvetsov A. N., Shaykina M. N., Yolkina E. S. Trends in the Settlement of Invasive Plant Species on the Territory of the Nature Sanctuary «Forested Ravine near the village of Vlasievo» (Moscow Oblast). Russian Journal of Biological Invasions. 2024;15(1):63–72.
DOI: https://doi.org/10.1134/S2075111724010089

4. Palkina T. A. Floral composition of the weed component of agrocenoses in the Ryazan region. *Izvestiya Timiryazevskoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy. 2011;(4):44–55. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16972188

5. Tulyakov D. G. Segetal flora of the Moscow region. *Izvestiya Timiryazevskoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy. 1982;(5):46–52. (In Russ.).

6. Nikitin V. V. Geographical distribution of the most important weeds of the USSR and their dynamics. *Botanichesky zhurnal*. 1979;64(7):943–949. (In Russ.).

7. Mikhaylova S. I., Ebel T. V., Sheremetova S. A., Ebel A. L. Weeds in agrocenoses and grain products of the Kemerovo region. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU. 2022;(6(183)):58–64. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-6-58-64

8. Beketova O. A., Ivanova N. V., Zhokhova E. A. The features of species composition of weed flora of Krasnoyarsk natural district. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU. 2019;(4(145)):10–15. (In Russ.).
URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38510359

9. Luneva N. N. Modern methods of the phytosanitary monitoring of weeds. *Zashchita i karantin rasteny*. 2009;(11):20–24. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12970619

10. Cherepanov S. K. Vascular plants of Russia and neighboring countries (within the former USSR). Saint-Petersburg: *Mir i Semya-95*, 1995. 992 p.
URL: https://books.google.ru/books?id=jvum0LHrXVMC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false

11. Lao F., Sigurdson G. T., Giusti M. M. Health benefits of purple corn (*Zea mays* L.) phenolic compounds. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2017;16(2):234–246.
DOI: https://doi.org/10.1111/1541-4337.12249

12. Ronzhina E. S. Winter and spring wheat (*Triticum aestivum* L.) in agroclimatic conditions of the Kaliningrad region. *Izvestiya KGTU* = KSTU News. 2018;(51):100–110. (In Russ.).
URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=vkjzkn

13. Shishlova N. Physiological and biochemical bases of triticale productivity and quality. Minsk: *«Belaruskaya navuka»*, 2019. 201 p.

14. Ponnusha B. S., Subramaniyam S., Pasupathi P., Subramaniyam B., Virumandy R. Antioxidant and Antimicrobial properties of Glycine Max – A review. International Journal of Current Biological and Medical Science. 2011;1(2):49–62. URL: https://web-archive.southampton.ac.uk/cogprints.org/7323/1/Antioxidant_and_Antimicrobial_properties_of_Glycine_Max-A_review.pdf

15. Anderson E. J., Ali M. L., Beavis W. D., Chen P., Clemente T. E., Diers B. W. et al. Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) breeding: history, improvement, production and future opportunities. Advances in Plant Breeding Strategies: Legumes. 2019;7(12):431–516. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-23400-3_12

16. Donskaya M. V., Velkova N. I., Naumkin V. P. Study of morphobiological features of common pea in joint crops with white mustard. *Zernoboboviye i krupyaniye kulturi* = Legumes and Groat Crops. 2017;(2(22)):79–83. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29331849

17. Mayorov S. R., Alekseev Yu. E., Bochkin V. D., Nasimovich Yu. A., Shcherbakov A. V. Alien flora of the Moscow region: composition, origin and ways of formation. Moscow: *Tov-vo nauchn izd KMK*, 2020. 576 p.

18. Bouchet A. S., Laperche A., Bissuel-Belaygue C., Snowdon R., Nesi N., Stahl A. Nitrogen use efficiency in rapeseed. A review. Agronomy for Sustainable Development. 2016;36(2):38. DOI: https://doi.org/10.1007/s13593-016-0371-0

19. Smirnov P. A. Flora of the Prioksko-Terrasny State Reserve. Proceedings of the Prioksko-Terrasny State Nature Reserve. Moscow, 1958. Iss. 2. 246 p. URL: https://www.booksite.ru/fulltext/rusles/Tryd/text.pdf

20. Fedchenko B. A. New additions to the flora of the Moscow province. Materials of knowledge of the fauna and flora of the Russian Empire. Department of botany. Moscow: *Universitetskaya tipogr.*, 1899. Iss.3. pp. 155–172.

21. Sukholozova E. A. Alien plants in wheat crops (Penza region). *Promishlennaya botanika* = Industrial botany. 2024;24(3):126–132. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.14114294

Вклад авторов: все авторы внесли равнозначный вклад в выполнение исследований и подготовку рукописи статьи.

Сведения об авторах

✉ **Куклина Алла Георгиевна**, кандидат биол. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории природной флоры, ФГБУН Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина Российской академии наук, ул. Ботаническая, 4, г. Москва, Российская Федерация, 127276, e-mail: info@gbsad.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9783-7776,** e-mail: alla_gbsad@mail.ru

Швецов Александр Николаевич, кандидат биол. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории природной флоры, ФГБУН Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина Российской академии наук, ул. Ботаническая, 4, Москва, Российская Федерация, 127276, e-mail: info@gbsad.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4018-8469**

Author contributions: all authors contributed equally to the research and preparation of the manuscript.

Information about the authors

✉ **Alla G. Kuklina**, PhD of Biological Science, leading researcher, the Laboratory of Natural Flora, Main Botanical Garden named after N. V. Tsitsin of the Russian Academy of Sciences, 4 Botanicheskaya Street, Moscow, Russian Federation, 127276, e-mail: info@gbsad.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0002-9783-7776,** e-mail: alla_gbsad@mail.ru

Alexander N. Shvetsov, PhD of Biological Science, leading researcher, the Laboratory of Natural Flora, Main Botanical Garden named after N. V. Tsitsin of the Russian Academy of Sciences, 4 Botanicheskaya Street, Moscow, Russian Federation, 127276, e-mail: info@gbsad.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4018-8469**

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.380–389
УДК 633.853.483+546.47

Семенная продуктивность и качество семян двух сортов горчицы сарептской при разных концентрациях цинка в корнеобитаемой среде

© 2026. Н. М. Казнина✉, Е. С. Холопцева, Ю. В. Батова
Институт биологии – обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», г. Петрозаводск, Российская Федерация

В настоящее время в России и других странах мира увеличиваются посевные площади горчицы сарептской (Brassica juncea* (L.) Czern.*), что связано с ее многоцелевым использованием, а также хорошей адаптацией к неблагоприятным факторам внешней среды. Известна также способность горчицы сарептской произрастать на почвах с повышенными концентрациями цинка. При этом содержание ионов этого металла в семенах растений, как правило, невысокое вследствие эффективной работы механизмов его детоксикации. Это предполагает возможность выращивания горчицы сарептской на семена на почвах с высоким уровнем цинка. В настоящей работе изучено влияние разных концентраций цинка (5, 50, 100 и 150 мг/кг субстрата) на семенную продуктивность и качество семян двух сортов горчицы сарептской (Славянка и Золушка). Исследования проведены в песчаном субстрате в условиях вегетационного опыта. Обнаружено, что высокие концентрации цинка в бóльшей степени влияют на количество и массу семян, в меньшей – на количество стручков и массу 1000 семян. Так, у сорта Славянка при концентрации цинка 150 мг/кг субстрата количество и масса семян уменьшились в 2 раза по сравнению с контролем. У сорта Золушка уже при концентрации металла 100 мг/кг субстрата оба показателя были в 4 раза меньше, чем у растений контрольного варианта. На основании полученных результатов составлен ряд показателей семенной продуктивности по степени отрицательного воздействия на них цинка. Выявлено, что качество сформированных семян, определяемое по энергии прорастания, всхожести семян и начальному росту проростков, оказалось высоким во всех вариантах опыта независимо от содержания цинка в субстрате. Более того, семена успешно прорастали и на «провокационном фоне» – высокой концентрации цинка (1000 мкМ). Наиболее устойчив к высоким концентрациям цинка – сорт Славянка. Сделан вывод о возможности и перспективности использования горчицы сарептской для выращивания на семена на загрязненных цинком почвах.

Ключевые слова: *Brassica juncea* (L.) Czern., *цинк, урожай семян, масса 1000 семян, энергия прорастания, всхожесть*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБУН Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» (тема № FMEN 2022-0004).
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Казнина Н. М., Холопцева Е. С., Батова Ю. В. Семенная продуктивность и качество семян двух сортов горчицы сарептской при разных концентрациях цинка в корнеобитаемой среде. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):380–389. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.380-389

Поступила в редакцию: 21.08.2025 Принята к публикации: 06.04.2026
Доработана после рецензирования:15.10.2025 Опубликована онлайн: 27.04.2026

Seed productivity and seed quality of two Sarepta mustard cultivars under different zinc concentrations in the root environment

© 2026. Natalia M. Kaznina✉, Ekaterina S. Kholoptseva, Yulia V. Batova
Institute of Biology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russian Federation

Currently, in Russia and other countries, the areas under Sarepta mustard (Brassica juncea* (L.) Czern.*) are increasing, which is associated with its multi-purpose use, as well as good adaptation to adverse environmental factors. The ability of Sarepta mustard to grow on soils with increased zinc concentrations is also known. At the same time, the content of this metal in plant seeds is usually low due to the effective operation of its detoxification mechanisms. This suggests the possibility of growing Sarepta mustard for seeds on soils with a high zinc level. In this work, the effect of different zinc concentrations (5, 50, 100 and 150 mg/kg of substrate) on seed productivity and seed quality of two Sarepta mustard cultivars ('Slavyanka' and 'Zolushka') was studied. The research was carried out in a sandy substrate under vegetation experiment conditions. It has been established that high zinc concentrations have a greater effect on the weight and number of seeds, and a lesser effect on the pods number and 1000 seeds weight. Thus, at a zinc concentration of 150 mg/kg of substrate, the number and weight of seeds in the 'Slavyanka' cultivar were 2 times less than in the control. In the 'Zolushka' cultivar even at zinc concentration of 100 mg/kg of substrate both parameters were 4 times lower than in the plants of the control variant. Based on the results, a number of seed productivity parameters were compiled according to the degree of zinc negative effect on them. It was also revealed that the quality of the formed seeds, determined by the germination energy, seed viability and the initial growth, was

high in all variants regardless of the zinc content in the substrate. Moreover, the seeds were able to germinate successfully even on a "provocative background" – a high zinc concentration (1000 μM). The 'Slavyanka' cultivar turned out to be the most resistant to high zinc concentrations. A conclusion was made about the possibility and prospects of using Sarepta mustard for growing seeds on zinc-contaminated soils.

Keywords: *Brassica juncea* (L.) Czern.*, zinc, seed yield, 1000 seeds weight, germination energy, germination*

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (theme No. FMEN 2022-0004).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors stated no conflict of interest.

For citations: Kaznina N. M., Kholoptseva E. S., Batova Yu. V. Seed productivity and seed quality of two Sarepta mustard cultivars under different zinc concentrations in the root environment. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):380–389. (In Russ.). https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.380-389

Received: 21.08.2025 Accepted for publication: 06.04.2026
Revised: 15.10.2025 Published online: 27.04.2026

В настоящее время во многих странах мира возрастает интерес к сельскохозяйственным культурам из семейства *Brassicaceae,* что объясняется их многофункциональностью, хозяйственной ценностью, а также увеличением производства масличного сырья и потребления биотоплива [1, 2]. В России предпочтение отдают горчице сарептской (*Brassica juncea* (L.) Czern.), посевные площади которой, в отличие от других видов этого семейства, постоянно увеличиваются [3]. Во многом это связано с тем, что горчица сарептская является универсальной многоцелевой культурой, которую выращивают для масличных, кормовых, сидеральных, лекарственных и технических целей. Кроме того, горчица сарептская хорошо адаптирована к целому ряду неблагоприятных факторов внешней среды, что позволяет ей успешно расти почти во всех климатических зонах [4, 5]. Известно также, что эта культура обладает высокой металлоустойчивостью и способна в довольно больших количествах накапливать некоторые тяжелые металлы, в том числе цинк, в подземных и надземных органах [6, 7], что позволяет рассматривать ее как перспективный вид для использования в фиторемедиации загрязненных металлами территорий [8].

Цинк широко распространен в природе, его среднее содержание в земной коре составляет около 83 мг/кг, а в поверхностных слоях почв изменяется от 17 до 125 мг/кг[1]. На содержание цинка в почвах сельскохозяйственного назначения большое влияние оказывает хозяйственная деятельность человека, в том числе внесение высоких доз минеральных удобрений, применение гербицидов и пестицидов. В результате в отдельных регионах содержание этого металла в почве может в десятки и даже сотни раз превышать ПДК [9].

Способность представителей семейства *Brassicaceae*, как и других металлоустойчивых видов растений, произрастать на почвах с высоким содержанием цинка обеспечивается наличием целого ряда механизмов, действующих на разных уровнях организации, среди них: связывание ионов металла различными лигандами в клеточной стенке, плазмалемме и цитоплазме клеток, изоляция ионов и их комплексов в вакуоли и других [10, 11]. Эффективное функционирование этих механизмов в корне и побеге ограничивает поступление избыточных количеств металла в репродуктивные органы и семена, поэтому в семенах значительного увеличения содержания цинка, как правило, не наблюдается [12]. Вследствие этого представляется перспективным выращивание горчицы сарептской на семена на почвах с повышенным содержанием цинка. Поскольку цинк является необходимым микроэлементом, некоторое повышение его концентрации в семенах горчицы может быть полезно при их использовании в пищевой промышленности.

Вместе с тем необходимо отметить, что исследований, касающихся влияния избытка цинка на семенную продуктивность растений горчицы сарептской, в литературе крайне мало. Хотя известно, что избыток некоторых металлов в почве может отрицательно сказаться на элементах семенной продуктивности у растений и привести к значительному снижению их урожая [13, 14].

[1]Битюцкий Н. П. Микроэлементы и растение: учебное пособие. СПб: изд-во С.-Петерб. ун-та, 1999. 232 с. URL: https://djvu.online/file/OISqngC6NeaOD

Цель исследования – сравнительное изучение семенной продуктивности и качества семенного потомства у двух сортов горчицы сарептской при выращивании в условиях избытка цинка в корнеобитаемой среде.

Научная новизна – впервые изучено влияние разных концентраций цинка на семенную продуктивность и качество семян у двух сортов горчицы сарептской.

Материал и методы. Объектом исследования были растения горчицы сарептской (*Brassica juncea* (L.) Czern.) сортов Славянка и Золушка, предоставленные отделом генетических ресурсов масличных и прядильных культур ФИЦ «Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова». Оба сорта являются безэруковыми, их семена рекомендованы для производства горчичного масла. Сорт Золушка более холодоустойчив и допущен для выращивания во всех регионах Российской Федерации, в том числе Северном и Северо-Западном; сорт Славянка менее холодоустойчив и допущен для возделывания в более южных районах.

Растения выращивали на Агробиологической станции КарНЦ РАН РАН (61.75 с. ш. и 34.35 в. д.) в песчаном субстрате в условиях вегетационного опыта при естественном освещении. Семена горчицы, предварительно замоченные на 3 суток в дистиллированной воде, высевали в вегетационные сосуды объемом 5 л с предварительно промытым и прокаленным песком (6 кг). Плотность посева – 12 растений на сосуд. Цинк в форме сульфата ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) в концентрациях 5 мг/кг (оптимальная), 50, 100 и 150 мг/кг вносили одноразово в сухом виде при закладке опыта. Выбранные концентрации цинка в 2, 4 и 6 раз превышают предельно допустимые концентрации (ПДК) для песчаных почв (ГН 2.1.7.2041-06)[2]. Полив осуществляли питательным раствором Хогланда-Арнона[3] (без добавления солей цинка) по мере подсыхания субстрата. Повторность каждого варианта опыта трехкратная в течение двух вегетационных сезонов (2022–2023 гг.).

Для оценки влияния цинка на семенную продуктивность определяли количество стручков, количество и массу семян с сосуда, массу 1000 семян. Стручки снимали по мере их созревания. О качестве сформированных семян судили по энергии прорастания и всхожести, а также по начальному росту проростков второй генерации и их устойчивости к высокой концентрации цинка (1000 мкМ). Концентрация цинка выбрана на основе предварительных опытов, в которых изучалось влияние возрастающих концентраций (500, 1000, 1500, 2000 и 3000 мкМ) на прорастание семян горчицы. Концентрация 1000 мкМ оказалась наиболее высокой, при которой семена прорастали. При более высоких концентрациях прорастания семян не наблюдалось. Семена в количестве 25 шт. в 4-кратной повторности замачивали в чашках Петри с дистиллированной водой, а также с раствором, содержащим ионы цинка, и проращивали в темноте при температуре 25 °С. Энергию прорастания отмечали на 3-и сутки, всхожесть – на 6-е сутки[4], кроме того, на 6-е сутки у проростков измеряли длину корешка и гипокотиля.

Статистическую обработку данных осуществляли с использованием пакета статистического анализа Microsoft Office Excel 2007 и PAST 4.0. В таблицах и на графиках представлены средние значения и их стандартные ошибки (M±m). Достоверность различий между вариантами оценивали с помощью критерия Стьюдента. Различия считали достоверными при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение. Изучение показателей семенной продуктивности горчицы сарептской выявило наличие выраженных количественных и качественных сортовых различий. В частности, количество стручков, сформированных на растении сорта Славянка (рис. 1, *а*), во всех вариантах опыта было больше, чем у сорта Золушка (рис. 1, *б*), причем, если при концентрации цинка 5 и 50 мг/кг субстрата – в 1,3 раза, то при 100 мг/кг субстрата – в 2,2 раза. Кроме того, при наиболее высокой концентрации металла (150 мг/кг субстрата) у растений сорта Золушка наблюдалось значительное торможение роста и развития, и к завершению опыта они находились в вегетативной фазе. Напротив, у растений сорта Славянка при концентрации цинка 150 мг/кг субстрата стручки были сформированы, хотя их количество оказалось почти в 2 раза меньше, чем в варианте с концентрацией металла 5 мг/кг субстрата.

[2]Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 23 января 2006 г. № 1 О введении в действие гигиенических нормативов ГН 2.1.7.2041-06. [Электронный ресурс]. URL: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=9&documentId=299876 (дата обращения: 16.07.2025).

[3]Hoagland D. R., Arnon D. I. The water-culture method for growing plants without soil. Circular. California Agricultural Experiment station. 1938. Vol. 347. 39 pp. URL: https://archive.org/details/waterculturemeth347hoag/page/n5/mode/2up

[4]Семена и посадочный материал сельскохозяйственных культур. М.: Изд-во Стандартов, 1977. С. 270–302.

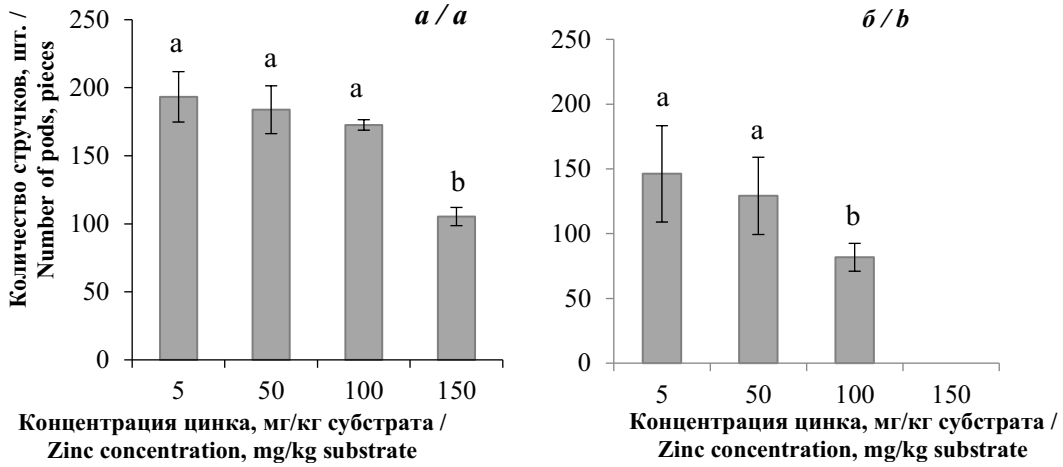


Рис. 1. **Влияние цинка на количество стручков у сортов горчицы сарептской: *а* – Славянка; *б* – Золушка. Разные буквы обозначают достоверные различия в пределах сорта при p<0,05 /**

Fig. 1. **The effect of zinc on the number of pods in Sarepta mustard cultivars: *a* – 'Slavyanka'; *b* – 'Zolushka'. Different letters indicate significant differences within the cultivar at p<0.05**

Количество сформированных семян и их масса в варианте с наименьшей концентрацией цинка у растений обоих сортов было практически равным (рис. 2, *а*, *б*). Однако при повышении концентрации металла наблюдали отчетливые сортовые различия. У растений сорта Славянка при концентрации цинка 50 мг/кг субстрата количество семян было таким же, как в варианте с 5 мг/кг субстрата. При дальнейшем увеличении концентрации до 100 и 150 мг/кг субстрата отмечено статистически значимое снижение семенной продуктивности почти в 2 раза по сравнению с минимальной концентрацией цинка (рис. 2, *а*).

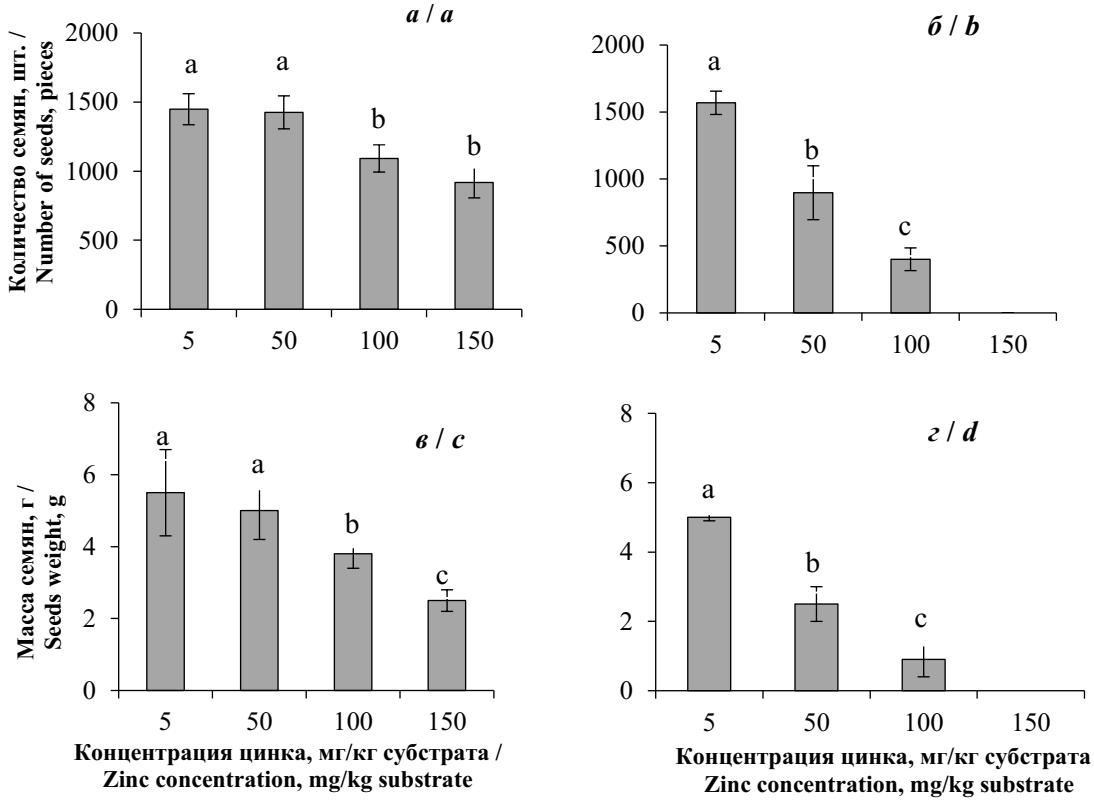


Рис. 2. **Влияние цинка на количество (*а*, *б*) и массу семян (*в*, *г*) у сортов горчицы сарептской Славянка (*а*, *в*) и Золушка (*б*, *г*). Разные буквы обозначают достоверные различия в пределах сорта при p<0.05 /**

Fig. 2. **The effect of zinc on the seed number (*a*, *b*) and seed weight (*c*, *d*) in Sarepta mustard cultivars 'Slavyanka' (*a*, *c*) and 'Zolushka' (*b*, *d*). Different letters indicate significant differences within the cultivar at p<0.05**

Аналогично уменьшалась и масса семян (рис. 2, *в*). У растений сорта Золушка уже при концентрации цинка 50 мг/кг субстрата количество семян существенно снизилось почти в 1,7 раза относительно варианта с концентрацией 5 мг/кг субстрата (рис. 2, *б*), а их масса – более чем в 2 раза (рис. 2, *г*). Дальнейшее повышение концентрации металла до 100 мг/кг привело почти к 4-кратному снижению обоих показателей.

Масса 1000 семян является одним из важных параметров семенной продуктивности растений. В ходе исследований было обнаружено, что у обоих сортов горчицы сарептской этот показатель изменялся в зависимости от концентрации цинка в субстрате в гораздо меньшей степени, чем количество стручков или семян (рис. 1, 2). Лишь высокие концентрации металла – 150 мг/кг субстрата у сорта Славянка (рис. 3, *а*) и 100 мг/кг субстрата у сорта Золушка (рис. 3, *б*) – приводили к значимому снижению массы 1000 семян по сравнению с минимальной концентрацией.

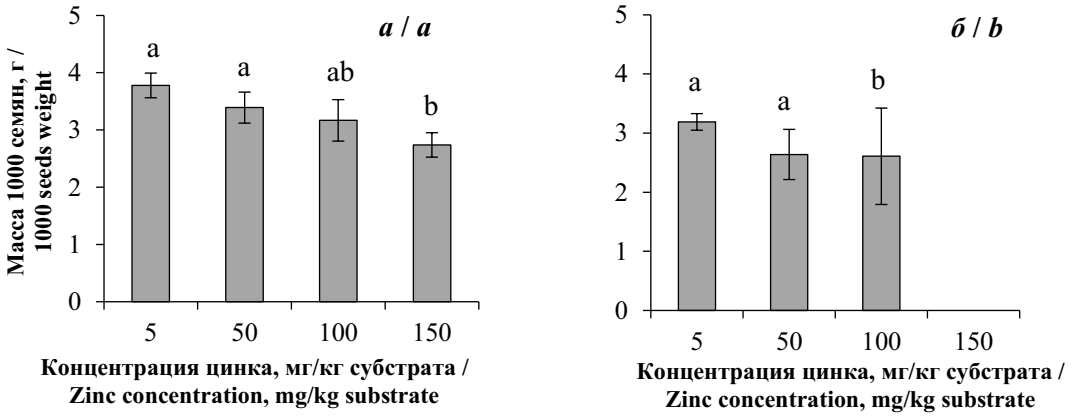


Рис. 3. **Влияние цинка на массу 1000 семян у сортов горчицы сарептской: *а* – Славянка; *б* – Золушка. Разные буквы обозначают достоверные различия в пределах сорта при p<0,05 /**

Fig. 3. **The effect of zinc on the 1000 seeds weight of Sarepta mustard cultivars: *a* – 'Slavyanka'; *b* – 'Zolushka'. Different letters indicate significant differences within the cultivar at p<0.05**

Известно, что показатель «масса 1000 семян» характеризует запас питательных веществ в семенах [14]. Обнаруженное уменьшение веса семян при высоких концентрациях цинка свидетельствует о снижении количества необходимых для формирования проростка веществ, что в дальнейшем может негативно отразиться на начальном росте растений.

К важным критериям, характеризующим качество семян, относится их жизнеспособность, определяемая по энергии прорастания и всхожести [15]. Известно, что посевные качества семян могут ухудшаться при неблагоприятных условиях окружающей среды, действующих в период их формирования. Например, при воздействии на материнские растения засухи, низкой и высокой температур или при недостатке элементов минерального питания образуются семена низкого качества, характеризующиеся невысокой всхожестью и замедленным начальным ростом проростков [16, 17].

В наших опытах семена обоих сортов горчицы сарептской, сформированные на материнских растениях при разных концентрациях цинка в субстрате, характеризовались хорошим качеством: энергия прорастания и всхожесть при проращивании на дистиллированной воде во всех вариантах опыта были высокими (табл. 1).

Более того, при проращивании семян горчицы сарептской на растворе с высокой (1000 мкМ) концентрацией цинка отрицательного воздействия металла на энергию прорастания и всхожесть у обоих сортов не наблюдали (табл. 2).

Сохранение высокой всхожести в присутствии избытка цинка, по-видимому, объясняется тем, что ионы тяжелых металлов проникают через семенную оболочку только на заключительной стадии набухания во время ее растрескивания. В это же время начинают действовать механизмы детоксикации металла, обеспечивающие связывание его ионов аминокислотами, поступающими из запасающих тканей зародыша [18].

Помимо жизнеспособности семян, для оценки их качества используют критерий «сила роста семян». Его определение включает

изучение показателей роста проростков на начальных этапах развития, а также определение устойчивости проростков к неблагоприятным условиям внешней среды [19]. Проведенные исследования показали, что, независимо от условий роста материнских растений (содержание цинка в субстрате), при проращивании семян обоих сортов на дистиллированной воде начальный рост проростков второй генерации был успешным. В частности, различий по длине корня (рис. 4, *а*) и гипокотиля (рис. 4, *б*) между разными вариантами практически не было. Хорошей силой роста обладали даже семена, сформированные при высоких концентрациях металла в субстрате – 100 мг/кг (оба сорта) и 150 мг/кг субстрата (сорт Славянка).

Таблица 1 – **Посевные качества семян сортов горчицы сарептской при проращивании на дистиллированной воде /**
Table 1 – **Sowing qualities of seeds of Sarepta mustard cultivars under germination in distilled water**

Сорт / Cultivar	*Концентрация цинка в субстрате материнских растений, мг/кг / Zinc concentration in the substrate of maternal plants, mg/kg*			
	5	*50*	*100*	*150*
Энергия прорастания, % / Germination energy, %				
Славянка / ‘Slavyanka’	95,2±2,1	98,3±1,4	92,2±2,1	81,3±2,1
Золушка / ‘Zolushka’	93,4±3,8	95,2±1,3	97,2±1,9	-
Всхожесть, % / Viability, %				
Славянка / ‘Slavyanka’	79,2±1,2	97,1±1,5	88,1±2,1	77,3±2,1
Золушка / ‘Zolushka’	81,2±2,9	85,1±4,2	89,2±2,5	-

Таблица 2 – **Посевные качества семян сортов горчицы сарептской при проращивании на растворе цинка в концентрации 1000 мкМ /**
Table 2 – **Sowing qualities of seeds of Sarepta mustard cultivars under germination in a zinc solution at 1000 μM concentration**

Сорт / Cultivar	*Концентрация цинка в субстрате материнских растений, мг/кг / Zinc concentration in the substrate of maternal plants, mg/kg*			
	5	*50*	*100*	*150*
Энергия прорастания, % / Germination energy, %				
Славянка / ‘Slavyanka’	97,1±0,5	98,0±1,5	91,2±2,1	89,2±2,0
Золушка / ‘Zolushka’	93,2±3,9	97,0±1,2	97,0±3,0	-
Всхожесть, % / Viability, %				
Славянка / ‘Slavyanka’	83,1±1,5	91,0±1,5	87,2±2,1	77,1±2,1
Золушка / ‘Zolushka’	84,2±4,1	86,1±4,8	89,2±2,5	-

В отличие от этого, при росте проростков в условиях высокой концентрации цинка у растений обоих сортов заметно тормозился рост корня, о чем свидетельствует уменьшение (по сравнению с проращиванием на дистиллированной воде) длины корешка (рис. 5, *а*). Аналогичную реакцию у горчицы сарептской при высоких концентрациях цинка наблюдали и другие авторы [20, 21]. Во многом это связано с отрицательным воздействием металла на деление и растяжение клеток [22]. При этом более устойчивыми к высокой концентрации цинка оказались проростки, полученные из семян, сформированных в условиях низкого содержания металла (5 и 50 мг/кг субстрата), что, вероятно, обеспечивалось большим количеством питательных веществ в семени. Важно отметить, что рост гипокотиля в этом варианте опыта замедлялся в меньшей степени, чем рост корня, что может быть результатом эффективной работы клеточных механизмов детоксикации ионов цинка.

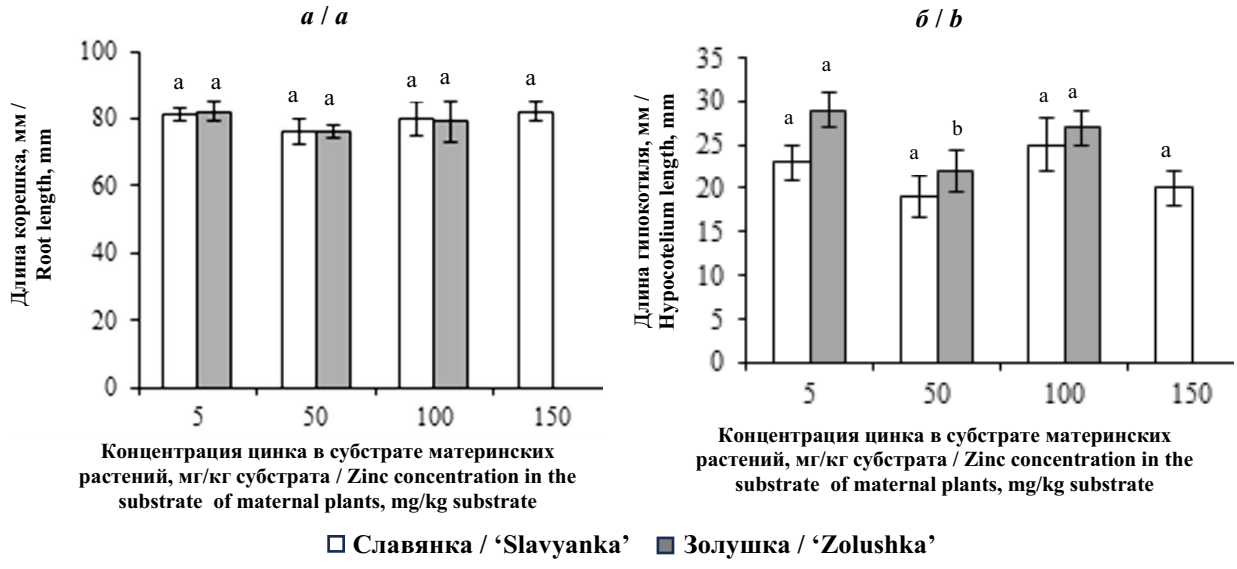


Рис. 4. **Длина корешка (*а*) и гипокотиля (*б*) у проростков второго поколения сортов горчицы сарептской при разных концентрациях цинка в субстрате материнских растений (проращивание на дистиллированной воде). Разные буквы обозначают достоверные различия в пределах сорта при p<0.05 /**

Fig. 4. **Length of the root (*a*) and hypocotyl (*b*) in the seedlings of the second generation of Sarepta mustard cultivars at different zinc concentrations in the substrate of the maternal plants (germination in distilled water). Different letters indicate significant differences within the cultivars at p<0.05**

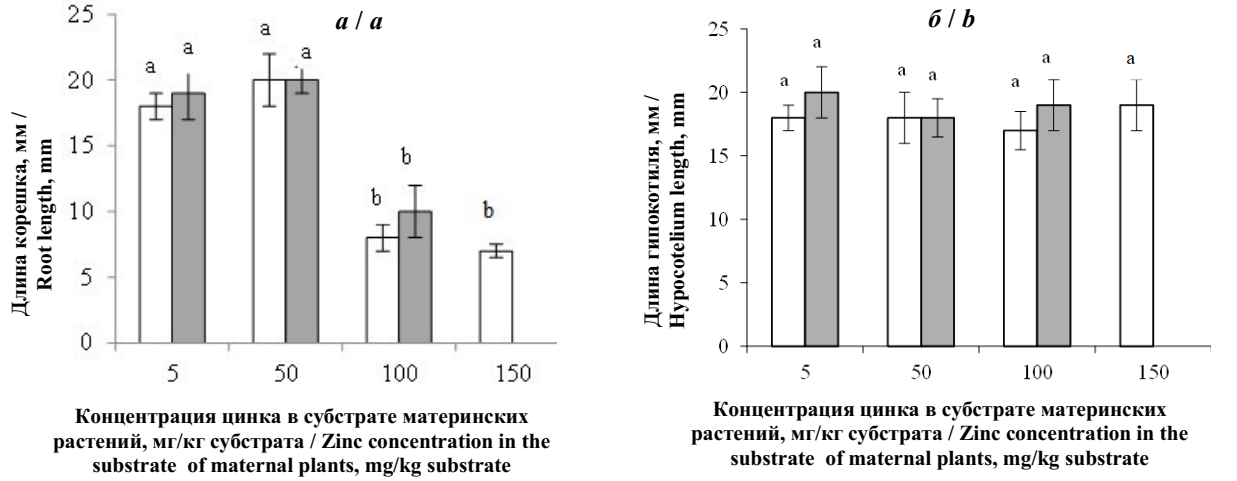


Рис. 5. **Длина корешка (*а*) и гипокотиля (*б*) у проростков второго поколения сортов горчицы сарептской при разных концентрациях цинка в субстрате материнских растений (проращивание на растворе цинка в концентрации 1000 мкМ). Разные буквы обозначают достоверные различия внутри сорта при p<0.05 /**

Fig. 5. **Length of the root (*a*) and hypocotyl (*b*) in the seedlings of the second generation of Sarepta mustard cultivars at different zinc concentrations in the substrate of the maternal plants (germination in a zinc solution at 1000 µM concentration). Different letters indicate significant differences within the cultivar at p<0.05**

Заключение. Впервые в сравнительном аспекте было изучено влияние разных концентраций цинка на семенную продуктивность и качество семян двух сортов горчицы сарептской. Растения сорта Славянка оказались более устойчивы к высоким концентрациям металла, чем сорта Золушка. В частности, они смогли перейти к генеративному развитию и сформировать полноценные семена, даже при концентрации цинка 150 мг/кг субстрата, тогда как

у растений сорта Золушка в этих условиях замедлялись рост и развитие, на протяжении всего опыта они оставались в вегетативной фазе. В ходе исследований было также выявлено, что у обоих изученных сортов горчицы высокие концентрации цинка в бóльшей степени влияют на массу и количество семян

на растении, в меньшей – на количество стручков и массу 1000 семян. По степени отрицательного воздействия цинка на показатели семенной продуктивности можно составить следующий ряд (по убыванию): масса семян> количество семян>количество стручков>масса 1000 семян. Проверка качества семян показала, что, независимо от концентрации цинка в корнеобитаемой среде материнских растений, у обоих сортов горчицы семена успешно прорастали как на дистиллированной воде, так и на провокационном фоне (высокая концентрация цинка) и имели хорошую «силу роста».

В целом горчица сарептская способна сформировать полноценные семена хорошего качества, даже в условиях повышенного содержания цинка в субстрате, что предполагает возможность и перспективность ее использования для выращивания на семена на загрязненных цинком почвах.

Список литературы

1. Лукомец В. М., Зеленцов С. В., Кривошлыков К. М. Перспективы и резервы расширения производства масличных культур в Российской Федерации. Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. 2015;(4(164)):81–102. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25304524 EDN: VHTFHF

2. Zhang X., Jia Q., Jia X., Li J., Sun X., Min L. et al. Brassica vegetables—an undervalued nutritional goldmine. Horticulture Research. 2025;12:uhae302. DOI: https://doi.org/10.1093/hr/uhae302

3. Трубина В. С., Сердюк О. А., Горлова Л. А. Экологическая стабильность и пластичность сортов горчицы сарептской яровой селекции ВНИИМК. Масличные культуры. 2024;(1(197)):40–44. DOI: https://doi.org/10.25230/2412-608X-2024-1-197-40-44 EDN: CRFEYV

4. Выходцев В. А., Тулькубаева С. А., Тулаев Ю. В., Сомова С. В., Нугманов А. Б. Продуктивность горчицы сизой в зависимости от минерального питания и применения удобрений на черноземах южных Костанайской области. Наука и образование. 2023;(2–2(71)):221–228. DOI: https://doi.org/10.52578/2305-9397-2023-2-2-221-228 EDN: FNEZXC

5. Гущина В. А., Лыкова А. С., Прохорова Ю. А. Формирование урожайности сортов горчицы сарептской в зависимости от нормы высева в лесостепи Среднего Поволжья. Аграрный научный журнал. 2024;(10):4–11. DOI: https://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i10pp4-11 EDN: ILKFLA

6. Huang H., Luo L., Huang L., Zhang J., Gikas P., Zhou Y. Effect of Manure Compost on Distribution of Cu and Zn in Rhizosphere Soil and Heavy Metal Accumulation by Brassica juncea. Water, Air, & Soil Pollution. 2020;231:195. DOI: https://doi.org/10.1007/s11270-020-04572-4

7. Kamal M. A., Perveen K., Khan F., Sayyed R. Z., Hock O. G., Bhatt S. C. et al. Effect of different levels of EDTA on phytoextraction of heavy metal and growth of Brassica juncea L. Frontiers in Microbiology. 2023;14:1228117. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1228117

8. Chaudhry H., Nisar N., Mehmood S., Iqbal M., Nazir A., Yasir M. Indian mustard Brassica juncea efficiency for the accumulation, tolerance and translocation of zinc from metal contaminated soil. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 2020;23:101489. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101489

9. Broadley M. R., White P. J., Hammond J. P., Zelko I., Lux A. Zinc in plants. New Phytologist. 2007;173:677–702. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x

10. Титов А. Ф., Казнина Н. М., Таланова В. В. Тяжелые металлы и растения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. 194 с. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23779831 EDN: UAJSQV

11. Pasricha S., Mathur V., Garg A., Lenka S., Verma K., Agarwal S. Molecular mechanisms underlying heavy metal uptake, translocation and tolerance in hyperaccumulators-an analysis: Heavy metal tolerance in hyperaccumulators. Environmental Challenges. 2021;4:100197. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100197

12. Ozturka L., Yazicia M. A., Yucelb C., Torunb A., Cekicc C., Bagcid A. et al. Concentration and localization of zinc during seed development and germination in wheat. Physiologia Plantarum. 2006;128(1):144–152. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00737.x

13. Батова Ю. В., Лайдинен Г. Ф., Казнина Н. М., Титов А. Ф. Влияние загрязнения кадмием на рост и семенную продуктивность однолетних злаков. Агрохимия. 2012;(6):79–83. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17868493 EDN: PBAKVH

14. Казнина Н. М., Задворная А. К., Батова Ю. В. Влияние избытка цинка на качество семян ячменя. Агрохимия. 2021;(8):57–61. DOI: https://doi.org/10.31857/S0002188121060065 EDN: MVMAFK

15. Николаева М. Г., Лянгузова И. В., Поздова Л. М. Биология семян. СПб: НИИ химии СПбГУ, 1999. 232 с. Режим доступа: https://djvu.online/file/XbZ0nmM5az4OQ

16. Nagel M., Kranner I., Neumann K., Rolletschek H., Seal C. E., Colville L. et al. Genome-wide association mapping and biochemical markers reveal that seed ageing and longevity are intricately affected by genetic background and developmental and environmental conditions in barley. Plant Cell & Environment. 2015;38(6):1011–1022. DOI: https://doi.org/10.1111/pce.12474

17. Zinsmeister J., Leprince O., Buitink J. Molecular and environmental factors regulating seed longevity. Biochemical Journal. 2020;477(2):305–323. DOI: https://doi.org/10.1042/BCJ20190165

18. Титов А. Ф., Таланова В. В., Казнина Н. М., Лайдинен Г. Ф. Устойчивость растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 170 с.
Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19495991 EDN: QKQKGB

19. Алексейчук Г. Н., Ламан Н. А. Физиологическое качество семян сельскохозяйственных культур и методы его оценки. Минск: Право и экономика, 2005. 48 с.
Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/318099496_Fiziologiceskoe_kacestvo_seman_selskoho-zajstvennyh_kultur_i_metody_ego_ocenki

20. Małecka A., Konkolewska A., Han´c A., Barałkiewicz D., Ciszewska L., Ratajczak E. et al. Insight into the Phytoremediation Capability of Brassica juncea (v. Malopolska): Metal Accumulation and Antioxidant Enzyme Activity. International Journal Molecular Sciences. 2019;20(18):4355. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms20184355

21. Liao Y., Li Z., Yang Z., Wang J., Li B., Zu Y. Response of Cd, Zn Translocation and Distribution to Organic Acids Heterogeneity in Brassica juncea L. Plants. 2023;12(3):479. DOI: https://doi.org/10.3390/plants12030479

22. Glińska S., Gapińska M., Michlewska S., Skiba E., Kubicki J. Analysis of Triticum aestivum seedling response to the excess of zinc. Protoplasma. 2016;253:367–377. DOI: https://doi.org/10.1007/s00709-015-0816-3

References

1. Lukomets V. M., Zelentsov S. V., Krivoshlikov K. M. Outlook and reserves the expansion of oil crops production in the Russian Federation. *Maslichniye kulturi. Nauchno-tekhnichesky byulleten Vserossiyskogo nauchno-issledovatelskogo instituta maslichnikh kultur* = Oil crops. Scientific and technical Bulletin of VNIIMK. 2015;(4(164)):81–102. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25304524

2. Zhang X., Jia Q., Jia X., Li J., Sun X., Min L. et al. Brassica vegetables—an undervalued nutritional goldmine. Horticulture Research. 2025;12:uhae302. DOI: https://doi.org/10.1093/hr/uhae302

3. Trubina V. S., Serdyuk O. A., Gorlova L. A. Ecological stability and plasticity of spring brown mustard variety of VNIIMK breeding. *Maslichniye kulturi* = Oil crops. 2024;(1(197)):40–44. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.25230/2412-608X-2024-1-197-40-44

4. Vikhodtsev V. A., Tulkubayeva S. A., Tulayev Yu. V., Somova S. V., Nugmanov A. B. Productivity of mustard gray depending on mineral nutrition and the use of fertilizers on the chernozems of the southern Kostanay region. *Nauka i obrazovaniye*. 2023;(2–2(71)):221–228. (In Kazakhstan).
DOI: https://doi.org/10.52578/2305-9397-2023-2-2-221-228

5. Gushchina V. A., Lykova A. S., Prokhorova Yu. A. Yield formation of chinese mustard varieties depending on seeding rate in the forest-steppe of the Middle Volga region. *Agrarny nauchny zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2024;(10):4–11. (In Russ.). DOI: https://dx.doi.org/10.28983/asj.y2024i10pp4-11

6. Huang H., Luo L., Huang L., Zhang J., Gikas P., Zhou Y. Effect of Manure Compost on Distribution of Cu and Zn in Rhizosphere Soil and Heavy Metal Accumulation by Brassica juncea. Water, Air, & Soil Pollution. 2020;231:195. DOI: https://doi.org/10.1007/s11270-020-04572-4

7. Kamal M. A., Perveen K., Khan F., Sayyed R. Z., Hock O. G., Bhatt S. C. et al. Effect of different levels of EDTA on phytoextraction of heavy metal and growth of Brassica juncea L. Frontiers in Microbiology. 2023;14:1228117. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1228117

8. Chaudhry H., Nisar N., Mehmood S., Iqbal M., Nazir A., Yasir M. Indian mustard Brassica juncea efficiency for the accumulation, tolerance and translocation of zinc from metal contaminated soil. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. 2020;23:101489. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101489

9. Broadley M. R., White P. J., Hammond J. P., Zelko I., Lux A. Zinc in plants. New Phytologist. 2007;173:677–702. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x

10. Titov A. F., Kaznina N. M., Talanova V. V. Heavy metals and plants. Petrozavodsk: *Karelsky nauchny tsentr RAN*, 2014. 194 p. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23779831

11. Pasricha S., Mathur V., Garg A., Lenka S., Verma K., Agarwal S. Molecular mechanisms underlying heavy metal uptake, translocation and tolerance in hyperaccumulators-an analysis: Heavy metal tolerance in hyperaccumulators. Environmental Challenges. 2021;4:100197. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100197

12. Ozturka L., Yazicia M. A., Yucelb C., Torunb A., Cekicc C., Bagcid A. et al. Concentration and localization of zinc during seed development and germination in wheat. Physiologia Plantarum. 2006;128(1):144–152.
DOI: https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2006.00737.x

13. Batova Yu. V., Laydinen G. F., Kaznina N. M., Titov A. F. Effect of cadmium on the growth and seed production of annual cereals. *Agrokhimiya*. 2012;(6):79–83. (In Russ.).
URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17868493

14. Kaznina N. M., Zadvornaya A. K., Batova Yu. V. Effect of zinc excess on seed quality of barley. *Agrokhimiya*. 2021;(8):57–61. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.31857/S0002188121060065

15. Nikolayeva M. G., Lyanguzova I. V., Pozdova L. M. Biology of seeds. SPb: *NII khimii SPbGU*, 1999. 232 p. URL: https://djvu.online/file/XbZ0nmM5az4OQ

16. Nagel M., Kranner I., Neumann K., Rolletschek H., Seal C. E., Colville L. et al. Genome-wide association mapping and biochemical markers reveal that seed ageing and longevity are intricately affected by genetic background and developmental and environmental conditions in barley. Plant Cell & Environment. 2015;38(6):1011–1022. DOI: https://doi.org/10.1111/pce.12474

17. Zinsmeister J., Leprince O., Buitink J. Molecular and environmental factors regulating seed longevity. Biochemical Journal. 2020;477(2):305–323. DOI: https://doi.org/10.1042/BCJ20190165

18. Titov A. F., Talanova V. V., Kaznina N. M., Laydinen G. F. Plant resistance to heavy metals. Petrozavodsk: *Karelsky nauchny tsentr RAN*, 2007. 170 p. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19495991

19. Alekseychuk G. N., Laman N. A. Physiological quality of seeds of agricultural crops and methods of its assessment. Minsk: *Pravo i ekonomika*, 2005. 48 p.
URL: https://www.researchgate.net/publication/318099496_Fiziologiceskoe_kacestvo_seman_selskohozajstvennyh_kultur_i_metody_ego_ocenki

20. Małecka A., Konkolewska A., Han´c A., Barałkiewicz D., Ciszewska L., Ratajczak E. et al. Insight into the Phytoremediation Capability of Brassica juncea (v. Malopolska): Metal Accumulation and Antioxidant Enzyme Activity. International Journal Molecular Sciences. 2019;20(18):4355. DOI: https://doi.org/10.3390/ijms20184355

21. Liao Y., Li Z., Yang Z., Wang J., Li B., Zu Y. Response of Cd, Zn Translocation and Distribution to Organic Acids Heterogeneity in Brassica juncea L. Plants. 2023;12(3):479. DOI: https://doi.org/10.3390/plants12030479

22. Glińska S., Gapińska M., Michlewska S., Skiba E., Kubicki J. Analysis of Triticum aestivum seedling response to the excess of zinc. Protoplasma. 2016;253:367–377. DOI: https://doi.org/10.1007/s00709-015-0816-3

Вклад авторов: Казнина Н. М. – концепция и план исследования, анализ данных, подготовка рукописи; Холопцева Е. С., Батова Ю. В. – анализ данных, подготовка рукописи.

Сведения об авторах

✉ **Казнина Наталья Мстиславовна**, доктор биол. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологической физиологии растений, Институт биологии – обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Российская Федерация, 185910, e-mail: biology@krc.karelia.ru,
ORCID: **https://orcid.org/0000-0003-3092-563X**

Холопцева Екатерина Станиславовна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической физиологии растений, Институт биологии – обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Российская Федерация, 185910, e-mail: biology@krc.karelia.ru,
ORCID: **https://orcid.org/0000-0002-2280-3651**

Батова Юлия Валерьевна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической физиологии растений, Институт биологии – обособленное подразделение ФГБУН Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Российская Федерация, 185910, e-mail: biology@krc.karelia.ru,
ORCID: **https://orcid.org/0000-0003-3804-8651**

Author contributions: Kaznina N. M. – research concept and plan, data analysis, manuscript preparation; Kholoptseva E. S., Batova Yu. V. – data analysis, manuscript preparation.

Information about the authors

✉ **Natalia M. Kaznina**, DSc in Biological Science, leading researcher, the Laboratory of Ecological Physiology of Plants, Institute of Biology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya st., 11, Petrozavodsk, Russian Federation, 185910, e-mail: biology@krc.karelia.ru,
ORCID: **https://orcid.org/0000-0003-3092-563X**

Ekaterina S. Kholoptseva, PhD in Biological Science, senior researcher, the Laboratory of Ecological Physiology of Plants, Institute of Biology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya st., 11, Petrozavodsk, Russian Federation, 185910, e-mail: biology@krc.karelia.ru,
ORCID: **https://orcid.org/0000-0002-2280-3651**

Yulia V. Batova, PhD in Biological Science, senior researcher, the Laboratory of Ecological Physiology of Plants, Institute of Biology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Pushkinskaya st., 11, Petrozavodsk, Russian Federation, 185910, e-mail: biology@krc.karelia.ru,
ORCID: **https://orcid.org/0000-0003-3804-8651**

✉ – Для контактов / Corresponding author

КОРМОПРОИЗВОДСТВО: ПОЛЕВОЕ И ЛУГОВОЕ / FODDER PRODUCTION: FIELD AND MEADOW

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.390–400
УДК 633.6:574.24

(cc) BY

Оценка влияния метеорологических факторов на рост, развитие и урожайность гибрида сорго сахарного Силосное 88 в условиях Новгородской области

© 2026. Е. П. Шкодина✉, О. В. Балун
ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Особенности развития и формирования зеленой массы гибрида первого поколения сорго сахарного Силосное 88 для целей кормопроизводства изучали в 2017–2024 гг. в условиях Новгородской области на дерново-подзолистой среднеокультуренной почве. Посев проводили в III декаде мая с нормой высева 20 кг/га и междурядьем 15 см, наблюдения и учеты – по общепринятым методикам, урожайность зеленой массы определяли в фазу выхода в трубку (до выметывания). Полученные за период исследований данные по агрометеорологическим показателям, срокам прохождения фенофаз и урожайности зеленой массы сорго сахарного Силосное 88 послужили основой для проведения корреляционного и регрессионного анализов. Установлена взаимосвязь длительности межфазных периодов вегетации от суммы активных (выше 10 ºС) температур на всех этапах развития, наиболее сильная (r = 0,95–0,99) в межфазные периоды: «посев – всходы», «всходы – кущение», «кущение – выход в трубку». Увеличение количества выпавших осадков влияло на продолжительность межфазных периодов «всходы – кущение», «выход в трубку – выметывание», «выметывание – цветение» (r = 0,80–0,90). В период «всходы – кущение» установлена корреляционная взаимосвязь урожайности зеленой массы сорго сахарного Силосное 88 с суммой осадков (r = -0,59), суммой активных температур (r = -0,61) и длительностью периода (r = -0,75). Уравнение регрессии (R^2 = 0,56) показало, что уменьшение продолжительности периода «всходы – кущение» на 10 суток сопровождается повышением урожайности зеленой массы на 21 т/га. Полученные зависимости указывают, что для успешного выращивания сорго сахарного Силосное 88 необходимо наличие благоприятных агрометеорологических факторов на начальных этапах его развития, особенно в период «всходы – кущение» – именно в этот период закладывается его продуктивный потенциал.

Ключевые слова: *коэффициент корреляции, урожайность зеленой массы, фазы развития, длительность фаз, зернокормовые интродуценты, метеопараметры*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (тема FFZF-2025-0009, рег. № НИОКР 125031803947-7).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Авторы благодарят лабораторию селекции и первичного семеноводства сорговых культур ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр» за предоставленный семенной материал.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Шкодина Е. П., Балун О. В. Оценка влияния метеорологических факторов на рост, развитие и урожайность гибрида сорго сахарного Силосное 88 в условиях Новгородской области. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):390–400. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.390-400

Поступила: 04.02.2026 Принята к публикации: 13.04.2026
Доработана после рецензирования: 19.02.2026 Опубликована онлайн: 27.04.2026

Assessment of the influence of meteorological factors on the growth, development and yield of the ‘Silosnoe 88’ sweet sorghum hybrid in the Novgorod region

© 2026. Elena P. Shkodina✉, Olga V. Balun
St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation

The characteristics of growth and green mass formation of the first-generation sweet sorghum hybrid ‘Silosnoe 88’ for fodder production purposes were studied in 2017–2024 in the Novgorod region on sod-podzolic medium-cultivated soil. The sowing was carried out in the third ten-day period of May with a seeding rate of 20 kg/ha and a row spacing of 15 cm, observations and records were conducted according to generally accepted methods, the yield of green mass was determined during the shooting phase (up to the «heading of panicles» phase). The data obtained during the research period on agrome-

teorological indicators, timing of phenophases and yield of green mass of 'Silosnoe 88' sweet sorghum served as the basis for conducting correlation and regression analyses. A dependence of the duration of interphase periods of vegetation on the sum of active (above 10 °C) temperatures at all stages of plant development was established, but a closer relationship (r = 0.95–0.99) was observed in the interphase periods: "sowing – young growth", "young growth – tillering", "tillering – shooting". An increase in the amount of precipitation affected the duration of the interphase periods "young growth – tillering", "shooting – heading of panicles", "heading of panicles – flowering" (r = 0.80–0.90). During the "young growth – tillering" period, a correlation was established between the yield of green mass of 'Silosnoe 88' sweet sorghum hybrid and the amount of precipitation (r = -0.59), the amount of active temperatures (r = -0.61), and the duration of the period (r = -0.75). The regression equation (R^2 = 0.56) showed that a reduction in the duration of the "young growth – tillering" period by 10 days was accompanied by an increase in green mass yield by 21 t/ha. The obtained dependencies indicate that for the successful cultivation of 'Silosnoye 88' sweet sorghum, the presence of favorable agrometeorological factors is necessary at the initial stages of its development, especially during the "young growth – tillering" period. It is during this period that its productive potential is laid.

Keywords: *correlation coefficient, green mass yield, development phases, duration of phases, fodder cultures of introducers, meteorological parameters*

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (theme FFZF-2025-0009, reg. No. NIOKR 125031803947-7).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

The authors thank the Laboratory of Sorghum Breeding and Primary Seed Production of the North Caucasus Federal Agricultural Research Centre for the seed material provided.

Conflict of interest: the authors stated no conflict of interest.

For citations: Shkodina E. P., Balun O. V. Assessment of the influence of meteorological factors on the growth, development and yield of the 'Silosnoe 88' sweet sorghum hybrid in the Novgorod region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):390–400. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.390-400

Received: 04.02.2026 Accepted for publication: 13.04.2026
Revised: 19.02.2026 Published online: 27.04.2026

Новгородская область входит в зону рискованного земледелия, для которой процесс получения продукции растениеводства обусловлен высокими рисками: коротким вегетационным периодом, поздними весенними и ранними осенними заморозками, низким почвенным плодородием, низкой теплообеспеченностью в совокупности с повышенным количеством осадков. Подбор культур для целей растениеводства, в т. ч. кормопроизводства, ведется с учетом данных факторов риска. В настоящее время ученые говорят о потеплении климата на планете. Анализ данных по метеостанции Новгород показал, что эти явления затронули Новгородскую область: за последний 70-летний период сумма активных температур вегетационного периода выросла почти на 200 °С [1]. Отмечается, что с изменением климата увеличивается число опасных метеорологических явлений – ливней, смерчей, ураганных ветров, засушливых и, напротив, избыточно влажных периодов[1].

В Новгородской области в течение вегетации часто стали встречаться периоды с дефицитом влаги и высокой для региона температурой, дождливые периоды с низкими положительными температурами, поздние заморозки весной и ранние – осенью. Все чаще (особенно во второй половине вегетации) сочетания погодных факторов создают неблагоприятные условия для организации заготовки кормов: либо возникают трудности с уборкой травостоя из-за переувлажнения почвы, либо нет травостоя, пригодного к уборке, и образуется дефицит сырья для получения зеленой массы. Самый дешевый источник – многолетние травы – не в состоянии обеспечить потребности отрасли, возникает необходимость в поиске новых источников для производства кормов с высокими, адаптивными к меняющемуся климату свойствами.

В южных регионах нашей страны на кормовые цели традиционно выращиваются мятликовые культуры, обладающие высокой продуктивностью и одновременно нетребовательные к пищевому и водно-воздушному режимам. К ним относятся растения, включенные в группу зернокормовых: пайза, чумиза, могар, просо африканское, кукуруза, виды сорго (зерновое, травянистое, сахарное), сорго-суданковые гибриды. В ареале выращивания эти культуры используют в кормовом балансе на зернофураж, зеленый корм, сено, силос, сенаж, на выпас, они являются страховыми в случае гибели озимых хлебов при сильной засухе в начале вегетации [2].

[1]Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М., 2021. 104 с. URL: http://downloads.igce.ru/climate_change/ezhegodnye-doklady/doklad-o-klimate-rf-2020red2903.pdf

В Северо-Западном экономическом регионе из перечисленных культур хорошо известна и широко используется на корм кукуруза. Особенности выращивания и выбор подходящих для условий региона сортов и гибридов для кукурузы известны, поскольку она прошла интродукцию в середине XX века и широко используется в качестве силосной культуры. Остальные культуры в регионе до сих пор малоизвестны и редко применяются. Условия их выращивания, биологические особенности слабо или почти не изучены, хотя по характеристикам зеленой массы они не уступают кукурузе, при этом, по данным селекционеров и производственников зоны возделывания, они менее капризны и менее требовательны к условиям выращивания [3, 4, 5].

Сорго является самой теплолюбивой из перечисленных культур. Сорго сахарное (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) отличается наличием сочной сердцевины стеблей (у остальных видов сорго она полусухая или губчатая) с высоким содержанием легкорастворимых углеводов. Количество сахаров в соке колеблется от 12–14 до 16–20 % в зависимости от сорта или гибрида, поэтому сорго сахарное лучше поедается скотом в свежем виде и по кормовым достоинствам превосходит кукурузу[2, 3], поскольку зеленая масса хорошо сбалансирована по сахаро-протеиновому соотношению. Урожайность зеленой массы в зоне традиционного выращивания составляет 50 т/га и более [6, 7, 8]. В период созревания зерна стебли и листья у сахарного сорго остаются сочными, заготавливать силос из него можно вплоть до полной спелости зерна [9].

Сорго сахарное в качестве кормовой культуры активно изучается и внедряется в производство на юго-западе Нечерноземной зоны (Брянская область) [10], в Западной Сибири и на Алтае [11], в Республике Беларусь [12, 13]. Начали изучать возможности интродукции сорговых культур в начале 2020-х годов в Московском регионе и Вологодской области [14, 15]. В Новгородском НИИСХ – филиале СПб ФИЦ РАН вопросом выращивания в регионе на корм просовых и сорговых культур занимаются с 2016 г. Исследованиями установлено, что несмотря на южное происхождение, эти культуры проявили высокий адаптивный и продуктивный потенциал [16, 17].

Для расширения использования сахарного сорго в зеленом конвейере на Северо-Западе Нечерноземья необходимы знания о влиянии климатических условий местности на продуктивность и параметры онтогенеза культуры. В АНЦ «Донской» установили корреляционные связи параметров листовой пластины у сорго сахарного с урожайностью зеленой массы и метеоусловиями. Ученые выявили сильную зависимость между шириной листа и урожайностью зеленой массы. Определены прямые сильные корреляционные зависимости длины листа с урожайностью и количеством осадков за вегетационный период (r = 0,78±0,05) [18]. В Омской области выяснили, что в засушливых условиях урожайность сухого вещества сорго сахарного уменьшается в два и более раз по сравнению с благоприятными по влагообеспеченности [19]. На урожайность зеленой массы влияет и плотность посева. Для сортов Сажень и Лиственит оптимальной густотой посева определено 500 тыс. всхожих семян на 1 га [4]. В условиях юго-востока Республики Беларусь установлена прямая зависимость урожайности зеленой массы сорго сахарного от ГТК в оптимальные сроки уборки (R^2 = 0,64). Выявлена тесная линейная зависимость между урожайностью и количеством осадков на начальных этапах онтогенеза, в период от кущения до выхода в трубку, в то же время какой-либо существенной зависимости урожайности от количества тепловой энергии в эти фазы роста не отмечено [20]. Для сорго-суданкового гибрида Навигатор в условиях Новгородской области установлена тесная корреляционная связь между урожайностью и количеством осадков в период от посева до всходов (r = 0,88), а также между урожайностью и ГТК (r = 0,70) в период от посева до выхода в трубку. Также установлено, что в Северо-Западном регионе продолжительность периода от всходов до кущения у сорговых культур находится в тесной взаимосвязи с суммой активных температур и суммой осадков в этот период вегетации, а длительность этого периода влияет на уровень урожайности зеленой массы [21, 22].

[2]Медведев П. Ф., Сметанникова А. И. Кормовые растения европейской части СССР: справочник. Л.: Колос, Ленингр. отд-ние, 1981. 336 с.

[3]Капустин С. И., Володин А. Б. Возделывание сорго и однолетних кормовых культур в засушливых условиях юга России: учебно-методическое пособие. Ставрополь, 2022. 103 с.

Цель исследований – изучить особенности развития и формирования зеленой массы гибрида сорго сахарного Силосное 88 в зависимости от агрометеорологических условий Новгородской области.

Научная новизна – для Северо-Западного региона Нечерноземной зоны такие исследования проводятся впервые, границы выращивания сорго сахарного проходят по югу Нечерноземья (Центральный регион).

Материал и методы. Исследования проводили в течение восьми лет (2017–2024 гг.) на опытном участке Новгородского научно-исследовательского института сельского хозяйства – филиала Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук. Почвы участка типичные для региона, дерново-подзолистые, среднеокультуренные, по механическому составу легко- и среднесуглинистые. Пахотный горизонт (0–20 см) характеризовался низким содержанием гумуса – 2,81–3,57 % (по методу Тюрина[4]), слабокислой и близкой к нейтральной реакцией среды – pH_{KCl} – 5,1–6,6[5], повышенной и высокой обеспеченностью подвижными соединениями фосфора и калия –120–737 и 101–229 мг/кг соответственно (по методу Кирсанова[6]).

В качестве объекта для исследований выбран гибрид сорго сахарного первого поколения Силосное 88, который включен в Государственный реестр селекционных достижений в 1993 году (код гибрида 9002731[7]), имеет допуск в шести регионах, в Северо-Западном регионе допуска не имеет.

Оригинатором гибрида сорго сахарного Силосное 88 является ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», авторы А. Б. Володин, М. П. Жукова, Э. К. Вахопский, А. В. Широбоков. По данным оригинатора[8], сорго сахарное Силосное 88 является среднеспелым, в регионе возделывания вегетационный период составляет 110–120 дней, высота растений достигает 280 см, урожайность зеленой массы – 60–70 т/га, сухого вещества – 18 т/га, зерна – 6 т/га.

Предшественники сорго сахарного на опытных участках: в 2016 г. – овес; 2017, 2018 гг. – картофель; 2019 г. – занятый пар по пласту многолетних трав; 2020 г. – картофель; 2021–2024 гг. – овес. Посев проводили в 20-х числах мая рядовым способом с междурядьем 15 см, норма высева 20 кг/га на делянках 10 м^2 с систематическим размещением в 4-кратной повторности. Подготовка почвы стандартная, перед посевом вносились удобрения в дозе $N_{60}P_{60}K_{60}$ (азофоска), уход включал прополку и рыхление. Наблюдения за развитием растений и учеты проводили по методическим указаниям ВНИИК[9], урожайность определяли в фазу выхода в трубку до выметывания с целью использования в кормосырьевом конвейере на зеленый корм и сено.

Обработку данных для выявления зависимостей проводили на базе программных продуктов Microsoft Exel методами регрессионного и корреляционного анализов[10]. Существенность корреляционных связей определяли на уровне значимости 0,05.

Данные о погодных условиях за период наблюдений по метеостанции Великий Новгород[11] приведены в таблице 1, гидротермический коэффициент (ГТК) рассчитан по методу Селянинова[12].

В среднем за годы наблюдений количество годовых осадков и осадков вегетационного периода, среднегодовая температура и сумма активных температур вегетационного периода были выше нормы, а ГТК равен норме.

[4]ГОСТ 26213-21. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 7 с. URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/75803/

[5]ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1985. 7 с. URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/29278

[6]ГОСТ Р 54650-2011. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. М.: Стандартинформ, 2019. 7 с. URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/52221/

[7]Государственный реестр сортов и гибридов сельскохозяйственных растений, допущенных к использованию. [Электронный ресурс]. URL: https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektsionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/silosnoe-88-sorgo-sakharnoe/ (дата обращения 27.11.2025).

[8]Сорта и гибриды сельскохозяйственных культур селекции ФГБНУ «Северо-Кавказский ФНАЦ». Каталог. 15-е изд. Ставрополь, 2025 г. 233 с. URL: http://cloud.fnac.center/KATALOG-CENTRA.pdf

[9]Методические указания по проведению полевых опытов с кормовыми культурами. М.: ВНИИК, 1987. 197 с.

[10]Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

[11]Архив_погоды_в_Великом_Новгороде. [Электронный ресурс]. URL: http://rp5.ru/ (дата обращения 27.11.2025).

[12]Агрометеорология: учебник. СПб: ООО «КВАДРО», 2012. 368 с.

Таблица 1 – **Агрометеорологические условия за период исследований /**
Table 1 – **Agrometeorological conditions during the research period**

Год / Year	*Годовая сумма осадков, мм / Annual precipitation, mm*	*Среднегодовая температура воздуха, ℃ / Average annual temperature, ℃*	*Сумма осадков за период с t>10 ℃, мм / The amount of precipitation for a period with temperatures above 10 ℃, mm*	*Сумма температур выше 10 ℃, ℃ / The sum of temperatures greater than 10 ℃, ℃*	*ГТК / Hydrotherma l coefficient*
2017	885	5,8	481	1952	2,46
2018	543	6,1	274	2414	1,14
2019	821	6.8	392	2084	1,88
2020	587	7,7	253	2366	1,07
2021	817	5,8	404	2207	1,83
2022	525	6,2	232	1961	1,18
2023	701	6,5	239	2359	1,01
2024	671	7,4	237	2533	0,94
Среднее / Average	**694**	**6,5**	**314**	**2235**	**1,41**
Среднемноголетнее / Annual average value	**605**	**5,7**	**308**	**2177**	**1,41**

За восемь лет наблюдений годовая сумма осадков в течение трех лет была ниже среднемноголетнего значения, на протяжении пяти лет – выше на 11–46 %. Среднегодовая сумма осадков за период исследований превысила среднее многолетнее значение на 89 мм (15 %), среднегодовая температура– на 0,8 °С (14 %). Вегетационные периоды по влагообеспеченности также отличались большим разнообразием: пять лет количество осадков отмечено ниже среднемноголетних значений на 37–76 мм, три года – выше на 84–173 мм. По теплообеспеченности вегетационные периоды в среднем были на 58 °С теплее нормы, по влагообеспеченности отличались экстремальностью: избыточно увлажненные (ГТК – 1,83–2,46), засушливые (ГТК = 0,94) и обеспеченного увлажнения (ГТК –1,01–1,18). Анализ данных по суммам активных температур и суммам осадков за вегетационный период позволил получить тренд на снижение теплообеспеченности вегетационного периода при увеличении влагообеспеченности по зависимости: $y = -1{,}32x + 26$, при коэффициенте детерминации $R^2 = 0{,}35$.

Результаты и их обсуждения. Посев сорго сахарного Силосное 88 проводили в годы исследований, как правило, в третьей декаде мая, за исключением 2019 и 2022 гг., когда благоприятные условия для посева сложились к середине – концу второй декады (табл. 2).

Сорго сахарное, как и все сорговые культуры, отличается медленным ростом на начальном этапе, т. к. сначала культура формирует корневую систему. Период от посева до всходов составлял две – три недели (14–22 суток), в 2018 г. он составил полтора месяца (44 суток), т. к. в этот промежуток времени практически отсутствовали осадки, всходы появились после первых выпавших дождей. Длительность межфазного периода от всходов до кущения в среднем составила три недели, однако в 2018 и 2024 гг. – менее двух недель (12-13 дней), а в 2023 г. – 41 день.

Продолжительность периода от всходов до фазы выметывания, когда формировалась урожайность зеленой массы, в 2018, 2021, 2022, 2024 гг. была более двух месяцев (64–75 суток), в 2019, 2020, 2023 гг. достигала трех месяцев и более (83–105 суток), в 2017 г. растения до конца вегетации находились в фазе выхода в трубку. В период исследований отмечены большие колебания урожайности зеленой массы: минимальная (20–21 т/га) получена в 2017 и 2023 гг., максимальная (107–110 т/га) – в 2020 и 2021 гг.

Влияние погодных условий на длительность межфазных периодов вегетации оценивали с помощью методов корреляционного и регрессионного анализов. Основными критериями, влияющими на рост и развитие растений, являются сумма активных температур (выше 10 ºС) и количество выпавших за этот период осадков. Корреляционный анализ показал прямую положительную взаимосвязь между длительностью межфазных периодов и суммой осадков на всех этапах развития сорго сахарного Силосное 88 (r = 0,46–0,90, при p = 0,05), кроме периодов «посев – всходы»,

«кущение – выход в трубку», «посев – цветение». Наиболее существенна данная зависимость в межфазные периоды «всходы – кущение», «выход в трубку – выметывание», «выметывание – цветение» (r = 0,80–0,90). Полученные уравнения регрессии (R^2 = 0,54–0,81) показывают, что на определенных этапах роста и развития растений при увеличении количества выпавших осадков межфазные периоды удлинялись (табл. 3).

Таблица 2 – **Сроки наступления фаз роста и развития гибрида сорго сахарного Силосное 88 и урожайность зеленой массы в годы исследований /**
Table 2 – **Timing of the growth and development phases of 'Silosnoe 88' sugar sorghum hybrid and the yield of green mass during the years of research**

Год / Year	*Дата посева / Date of sowing*	*Фаза роста и развития / Growth and development phase*					*Дата заморозка / Date of frost*	*Урожайность зеленой массы, т/га / Green mass yield, t/ha*
		всходы / young growth	*кущение / tille-ring*	*выход в трубку / shooting*	*выметывание / heading of panicles*	*цветение / flowe-ring*		
2017	22.05	07.06	28.06	09.08	-	-	21.10	21
2018	22.05	05.07	18.07	24.07	07.09	20.09	25.09	71
2019	15.05	06.06	24.06	05.07	11.09	-	18.09	58
2020	25.05	08.06	30.06	11.08	30.08	15.09	21.10	110
2021	25.05	09.06	30.06	15.07	12.08	07.09	17.09	107
2022	18.05	06.06	05.07	25.07	19.08	29.08	05.09	27
2023	23.05	13.06	24.07	11.09	26.09	09.10	10.10	20
2024	21.05	06.06	18.06	10.07	20.08	04.09	21.09	99

Таблица 3 – **Зависимость продолжительности межфазных периодов вегетации гибрида сорго сахарного Силосное 88 (y, сут) от метеопараметров (x) (2017–2024 гг.) /**
Table 3 – **Dependence of the duration of interphase periods of 'Silosnoe 88' sweet sorghum hybrid (y, days) on meteorological parameters (x) (2017–2024)**

Межфазный период / The interphase period	*Метеопараметр / Meteorological parameter*		
	сумма осадков, мм / precipitation amount, mm	*сумма температур воздуха>10 ºС, ºС / The sum of air temperatures >10 ºС, ºС*	*ГТК / hydrothermal coefficient*
Посев – всходы / Sowing – young growth	y = 0,11x + 16,89 R^2 = 0,06	y = 0,06x + 2,10 R^2 = 0,93	y = -3,27x + 25,31 R^2 = 0,11
Всходы – кущение / Young growth – tillering	y = 0,34x + 8,98 R^2 = 0,64	y = 0,06x - 2,93 R^2 = 0,91	y = 17,82x + 6,93 R^2 = 0,14
Кущение – выход в трубку / Tillering – shooting	y = 0,003x + 17,68 R^2 = 0,01	y = 0,06x - 0,57 R^2 = 0,98	y = -1,80x + 27,00 R^2 = 0,15
Выход в трубку – выметывание / Shooting – heading of panicles	y = 0,29x + 9,26 R^2 = 0,73	y = 0,05x - 0,80 R^2 = 0,81	y = 18,64x + 9,41 R^2 = 0,21
Выметывание – цветение / Heading of panicles – flowering	y = 0,07x + 11,09 R^2 = 0,81	y = 0,06x + 1,14 R^2 = 0,78	y = 1,41x + 12,12 R^2 = 0,33
Посев – кущение / Sowing – tillering	y = 0,28x + 22,53 R^2 = 0,47	y = 0,06x + 1,46 R^2 = 0,62	y = 11,91x + 33,12 R^2 = 0,11
Посев – выход в трубку / Sowing – shooting	y = 0,10x + 47,78 R^2 = 0,50	y = 0,05x + 9,99 R^2 = 0,80	y = 3,56x + 63,68 R^2 = 0,02
Посев – выметывание / Sowing – heading of panicles	y = 0,22x + 51,85 R^2 = 0,38	y = 0,07x - 16,49 R^2 = 0,64	y = 19,18x + 76,50 R^2 = 0,06
Посев – цветение / Sowing – flowering	y = 0,03x + 103,71 R^2 = 0,03	y = 0,06x - 3,72 R^2 = 0,53	y = 7,37x + 97,52 R^2 = 0,03
Всходы – выход в трубку / Young growth – Shooting	y = 0,15x + 25,66 R^2 = 0,54	y = 0,06x + 1,52 R^2 = 0,89	y = 4,28x + 41,34 R^2 = 0,03
Всходы – выметывание / Young growth – heading of panicles	y = 0,27x + 29,99 R^2 = 0,48	y = 0,07x - 21,72 R^2 = 0,68	y = 25,20x + 46,53 R^2 = 0,10
Всходы – цветение / Young growth – flowering	y = 0,12x + 57,06 R^2 = 0,21	y = 0,10x - 74,55 R^2 = 0,69	y = 13,37x + 67,31 R^2 = 0,06

Установлено, что сумма активных температур на длительность фаз развития сорго сахарного в условиях умеренного климата оказывает еще более существенное влияние, тесные корреляционные связи прослеживаются во все межфазные периоды (r = 0,72–0,99). Сильная взаимосвязь (r = 0,95–0,99) выявлена между продолжительностью фаз развития и уровнем теплообеспеченности в межфазные периоды «посев – всходы», «всходы – кущение», «кущение – выход в трубку». Наиболее важно наличие тепла в межфазный период «кущение – выход в трубку» (r = 0,99, R^2 = 0,98).

Влияния ГТК на длительность большинства межфазных периодов не выявлено.

Учет урожая зеленой массы сорго сахарного Силосное 88 проводили до фазы выметывания, средняя урожайность за 8 лет изучения составила 64 т/га (от 20 до 110 т/га). Сумма активных температур в эти годы за период от всходов до выметывания изменялась в пределах 1483–2167 °С, сумма осадков – 158–234 мм, ГТК – 1,07–1,71. Результаты регрессионного анализа по выявлению зависимостей урожайности зеленой массы от метеорологических показателей вегетационных периодов показаны в таблице 4.

Таблица 4 – **Зависимость урожайности зеленой массы гибрида сорго сахарного Силосное 88 (y, т/га) от метеоусловий и продолжительности межфазного периода (x) (2017–2024 гг.) /**
Table 4 – **Dependence of the yield of 'Silosnoe 88' sweet sorghum hybrid green mass (y, t/ha) on weather conditions and the duration of the interphase period (x) (2017–2024)**

Межфазный период / The interphase period	*Сумма осадков, мм / Sum of precipitation, mm*	*Сумма температур, воздуха>10 ºС, ºС / Sum of air temperatures >10 ºС, ºС*	ГТК / *Hydrothermal coefficient*	*Продолжительность межфазного периода, сут / Duration of the interphase period, days*
Посев – всходы / Sowing – young growth	y = 0,21x + 56,64	y = 0,01x + 62,02	y = 0,25x + 63,79	y = -0,46x + 3,83
	R^2 = 0,01	R^2 = 0,01	R^2 = 0,01	R^2 = 0,01
Всходы – кущение / Young growth – tillering	y = -0,70x + 99,24	y = -0,12x + 115,32	y = -54,18x + 121,73	y = -2,09x + 118,21
	R^2 = 0,35	R^2 = 0,37	R^2 = 0,17	R^2 = 0,56
Кущение – выход в трубку / Tillering – shooting	y = -0,35x + 89,87	y = 0,004x + 62,73	y = -6,16x + 80,78	y = -0,07x + 65,61
	R^2 = 0,33	R^2 = 0,01	R^2 = 0,27	R^2 = 0,01
Выход в трубку – выметывание / Shooting – heading of panicles	y = 0,20x + 54,35	y = 0,02x + 59,25	y = 46,10x + 13,74	y = -0,05x + 72,05
	R^2 = 0,09	R^2 = 0,02	R^2 = 0,31	R^2 = 0,01
Посев – кущение / Sowing – tillering	y = -0,56x + 112,07	y = -0,11x + 146,12	y = -23,49x + 91,01	y = -2,24x + 168,95
	R^2 = 0,24	R^2 = 0,27	R^2 = 0,06	R^2 = 0,66
Посев – выход в трубку / Sowing – shooting	y = -0,28x + 109,53	y = -0,03x + 94,26	y = -23,09x + 97,90	y = -1,07x + 137,81
	R^2 = 0,39	R^2 = 0,06	R^2 = 0,27	R^2 = 0,33
Посев –выметывание / Sowing – heading of panicles	y = -0,11x + 94,14	y = -0,07x + 187,5	y = 12,66x + 54,96	y = -1,29x + 199,15
	R^2 = 0,02	R^2 = 0,17	R^2 = 0,01	R^2 = 0,44
Всходы – выход в трубку / Young growth – shooting	y = -0,31x + 102,42	y = -0,02x + 83,45	y = -26,63x + 105,52	y = -0,76x + 100,73
	R^2 = 0,45	R^2 = 0,06	R^2 = 0,36	R^2 = 0,21
Всходы –выметывание / Young growth – heading of panicles	y = -0,26x + 117,78	y = -0,06x + 154,85	y = -28,08x + 105,51	y = -1,22x + 165,92
	R^2 = 0,10	R^2 = 0,11	R^2 = 0,03	R^2 = 0,33

Уровень урожайности зеленой массы сорго сахарного Силосное 88 умеренно коррелирует с количеством выпавших осадков в межфазные периоды «всходы – кущение» и «кущение – выход в трубку» (-0,57–0,59), объяснительная способность уравнения регрессии для периода «всходы – выход в трубку» также умеренная (R^2 = 0,45). В период от посева до всходов и от выхода в трубку до выметывания связи урожайности культуры с осадками не установлено.

Сумма активных температур в сильной степени влияла на урожайность сорго сахарного Силосное 88 в период «всходы – кущение» (r = -0,61), однако объяснительная способность регрессионной умеренная (R^2 = 0,37). В остальные периоды зависимости урожайности от сумм активных температур не установлено.

Средняя прямая степень взаимосвязи урожайности от ГТК отмечена в межфазный период «выход в трубку – выметывание» (r = 0,56, R^2 = 0,31) и обратная в межфазный период «всходы – выход в трубку» (r = -0,60, R^2 = 0,36), в остальные периоды связь слабая или не прослеживается.

Продолжительность межфазных периодов «всходы – кущение» и «посев – кущение» оказала сильное влияние на величину урожайности сорго сахарного Силосное 88 (r = -0,75 и r = -0,81 соответственно), что подтверждается приемлемостью (R^2 = 0,56–0,66) соответствующих уравнений регрессии, согласно которым урожайность зеленой массы снижается в среднем на 2,09–2,24 т/га, если длительность отмеченных периодов увеличивается на сутки. Взаимосвязь урожайности зеленой массы и длительности периодов «всходы – выход в трубку», «всходы – выметывание», «посев – выход в трубку» находилась на среднем уровне с коэффициентами корреляции -0,45…-0,57, но слабой объяснительной способностью регрессионной модели (R^2 = 0,21–0,33).

Таким образом, анализ материалов исследований показал, что урожайность сорго сахарного Силосное 88 зависит от скорости прохождения фаз роста и развития в начальный период вегетации. В межфазный период «всходы – кущение» на урожайность зеленой массы сорго сахарного Силосное 88 существенное влияние оказывают сразу три показателя: сумма активных температур (r = -0,61), сумма осадков (r = -0,59) и длительность межфазного периода (r = -0,75).

Заключение. Исследования особенностей развития и формирования зеленой массы гибрида сорго сахарного Силосное 88 в условиях Новгородской области в период 2017–2024 гг. выявило тесную корреляционную взаимосвязь (r = 0,53–0,99) между продолжительностью межфазных периодов вегетации и суммой активных температур. Наиболее тесная связь прослеживается между количеством осадков и продолжительностью периодов «всходы – кущение», «выход в трубку – выметывание», «выметывание – цветение», «посев – выход в трубку», «всходы – выход в трубку» (r = 0,71–0,90). Уровень урожайности зеленой массы гибрида сорго сахарного Силосное 88 закладывается в период от всходов до кущения в зависимости от метеорологических условий. Полученное уравнение регрессии (R^2 = 0,56) показывает, что уменьшение продолжительности этого периода на 10 суток приводит к повышению урожайности зеленой массы сорго на 21 т/га.

Таким образом, в условиях Новгородской области для сорго сахарного Силосное 88 особенно важно наличие благоприятных погодных условий на начальном этапе развития, в межфазный период «всходы – кущение», именно в этот период закладывается потенциал продуктивности культуры.

Список литературы

1. Балун О. В., Яковлева В. А. Влияние способа осушения на водно-воздушный режим мелиорируемых почв. Современные тенденции в научном и кадровом обеспечении АПК: Мат-лы Всеросс. научн.-практ. конф. с международ. участием. Великий Новгород: Новгородский ГУ имени Ярослава Мудрого, 2020. С. 272–277. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42923285 EDN: BJVBUT

2. Кибальник О. П., Ефремова И. Г., Бочкарева Ю. В., Прахов А. В., Семин Д. С. Продуктивность сорговых культур в зависимости от агротехнических приемов возделывания в регионах Российской Федерации (обзор). Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021;22(2):155–166.
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.2.155-166 EDN: FWGDSM

3. Дуборезов И. В., Косолапов А. В., Дуборезов В. М. Урожайность и питательность вегетативной массы силосных культур. Российская сельскохозяйственная наука. 2022;(3):14–18.
DOI: https://doi.org/10.31857/S2500262722030036 EDN: GBUSKH

4. Эргашев Ш. Т., Дронов А. В., Бельченко С. А., Милехина Н. В. Особенности развития и биологическая урожайность кормовой массы новых сортов сорго сахарного [*Sorghum Saccharatum* (L.) Moench] в агроклиматических условиях Брянского Ополья. Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК: мат-лы XXII Международ. научн.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рожд. Заслуж. работника с/х РСФСР, зав. Кокинским опорным пунктом НИЗИСНП, доцента кафедры плодоовощеводства Брянского СХИ А. А. Высоцкого и 85-летию со дня рожд. Заслуж. деятеля науки РФ, доктора с.-х. наук, проф., зав. каф. общего земледелия и раст-ва Брянской ГСХА В. Ф. Мальцева. Брянск: Брянский ГАУ, 2025. С. 101–106. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=82514168 EDN: SIWRMD

5. Антимонова О. Н., Сыркина Л. Ф., Антимонов А. К. Питательная ценность кормов из сахарного и зернового сорго в одновидовых и совместных компонентах. Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2024;(3(75)):62–70.
DOI: https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-03-07 EDN: DQQMXL

6. Васькина Т. И., Камитов Ш. С., Зайцева О. А. Адаптивность и урожайность сортов сорго сахарного [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] при возделывании на серых лесных почвах Брянской области. Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК: мат-лы XVIII Международ. научн. конф. Кокино: Брянский ГАУ, 2021. Т. Часть 2. С. 86–93. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=47127319 EDN: ZLBUZX

7. Дронов А. В., Бельченко Д. С. Урожайность кормовой массы сорго сахарного (*Sorghum saccharatum* (L.) Pers) в зависимости от плотности посева на юго-западе Нечерноземья. Сахарная свекла. 2023;(5):28–31. DOI: https://doi.org/10.25802/SB.2023.56.52.006 EDN: IPKRPG

8. Капустин С. И., Володин А. Б., Капустин А. С., Кухарук М. Ю. Хозяйственно ценные признаки конкурсного испытания сахарного сорго. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021;(3(89)):56–61. DOI: https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-89-3-56-61 EDN: CGIXFM

9. Сатторов Б. Н., Партоев К., Кубарев Е. Н., Кибальник О. П., Еланский С. Н., Астайкина А. А. Изучение сортов сахарного сорго в условиях Таджикистана. Научное обеспечение устойчивого развития агропромышленного комплекса в условиях аридизации климата: сб. мат-лов III Международн. научн.-практ. конф. Саратов: ООО Амирит, 2023. С. 158–162. Режим доступа: https://elibrary.ru/qmfrbm EDN: QMFRBM

10. Бельченко С. А., Верхоламочкин С. В., Дронов А. В., Дьяченко В. В., Сычев С. М., Малявко Г. П. Возделывание сорговых кормовых культур в условиях Центрального Нечерноземья. Брянск: Брянский ГАУ, 2025. 176 с. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=80387080 EDN: AVEYFS

11. Чебатарев А. П., Сыркина Л. Ф., Жаркова С. В., Володин А. Б., Пшеничникова Е. Н. Оценка агробиологических свойств сортов и линий сорго сахарного (*Sorghum saccharatum* L. Moench) в условиях лесостепной зоны алтайского края. Овощи России. 2025;(6):208–213.
DOI: https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-208-213 EDN: QGOWZJ

12. Зенькова Н. Н., Шлома Т. М., Ковалёва И. В., Моисеева М. О., Синцерова А. М. Перспективы возделывания сорговых культур в условиях Витебской области. Ученые записки учреждения образования Витебская ордена Знак почета государственная академия ветеринарной медицины. 2022;58(3):83–87.
DOI: https://doi.org/10.52368/2078-0109-2022-58-3-83-87 EDN: OLIMPE

13. Седукова Г. В., Кристова Н. В. Сравнительная оценка урожайности зеленой массы сорговых культур в разные фазы развития растений. Земледелие и селекция в Беларуси. 2024;(60):135–141.
Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=68615922 EDN: KKHLCZ

14. Булгакова В. М., Куликов М. А. Введение в культуру новых кормовых растений сорго в регион Московской области для увеличения разнообразия рационов кормления животных. Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2022;(41(46)):8–12.
Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=48697897 EDN: HJFNCT

15. Сухарева Л. В., Чухина О. В. Некоторые данные о возделывании Sorghum Saccuratum Jakuschev с использованием биопрепаратов в условиях Вологодской области. Передовые достижения науки в молочной отрасли: Сб. научн. тр. IV Международн. научн.-практ. конф., посвящ. дню рождения Н. В. Верещагина. Вологда: ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА им. Н. В. Верещагина, 2022. С. 188–193.

16. Shkodina E. P., Balun O. V., Kapustin S. I., Volodin A. B., Kapustin A. S. Ecological variety trial of annual forage crops in the Novgorod region. International Journal of Ecosystems and Ecology Science. 2022;12(2):337–344. DOI: https://doi.org/10.31407/ijees12.204 EDN: OKKECK

17. Шкодина Е. П. Биологические основы выращивания сорго на Северо-Западе Нечерноземной зоны. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021;22(4):531–541.
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.4.531-541 EDN: ZQMMYM

18. Романюкин А. Е., Ковтунова Н. А., Шуршалин В. А., Ермолина Г. М. Изменчивость основных элементов продуктивности сахарного сорго. Зерновое хозяйство России. 2022;14(3):69–75.
DOI: https://doi.org/10.31367/2079-8725-2022-81-3-69-76 EDN: BDHJBM

19. Тимохин А. Ю. Урожайность сорго сахарного на различных фонах минерального питания в южной лесостепи Западной Сибири. Молодежь и наука-2024: двигатель настоящего и залог успешного будущего: мат-лы Международ. научн.-практ. конф. Петропавловск: Северо-Казахстанский ун-т им. М. Козыбаева, 2024. С. 376–380.

20. Седукова Г. В., Кристова Н. В. Влияние метеорологических условий на урожайность зеленой массы сорго сахарного в фазу начала выброса метелки. Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК: мат-лы XX Международн. научн. конф. Брянск: Брянский ГАУ, 2023. Часть II. С. 112–117.
Режим доступа: https://elibrary.ru/dprpgf EDN: DPRPGF

21. Балун О. В., Шкодина Е. П. Влияние агрометеорологических факторов на продолжительность вегетации и урожайность зеленой массы сорго-суданкового гибрида Навигатор. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(2):339–346. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.2.339-346 EDN: CBDAWR

22. Балун О. В., Шкодина Е. П., Жукова С. Ю., Яковлева В. А. Зависимость урожайности зеленой массы и продолжительности межфазных периодов сорговых интродуцентов от условий выращивания. Аграрная наука. 2025;(8):70–77. DOI: https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-397-08-70-77 EDN: XSHTOB

References

1. Balun O. V., Yakovleva V. A. The influence of the drainage method on the water-air regime of reclaimed soils. Modern trends in scientific and personnel support of the agro-industrial complex: Proceedings of the All-Russian Scientific-practical conference with international participation. Veliky Novgorod: *Novgorodsky GU imeni Yaroslava Mudrogo*, 2020. pp. 272–277. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42923285

2. Kibalnik O. P., Efremova I. G., Bochkareva Yu. V., Prakhov A. V., Semin D. S. Productivity of sorghum crops depending on agrotechnical methods of cultivation in the regions of the Russian Federation (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2021;22(2):155–166. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.2.155-166

3. Duborezov I. V., Kosolapov A. V., Duborezov V. M. Yield and vegetative mass nutrition of silage crops. *Rossiyskaya selskokhozyaystvennaya nauka* = Russian Agricultural Sciences. 2022;(3):14–18. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.31857/S2500262722030036

4. Ergashev Sh. T., Dronov A. V., Belchenko S. A., Milekhina N. V. Features of development and biological yield of fodder mass new varieties of sugar sorghum [*Sorghum saccharatum* (L.) Moench] in agro-climatic conditions of the bryansk region. Agroecological aspects of the sustainable development of the agroindustrial complex: Proceedings of the XXII International scientific and practical conference, dedicated to the 100th anniversary of the birth of A. A. Vysotsky, Honored Worker of Agriculture of the RSFSR, Head of Kokinsky stronghold of Scientific Research Institute, associate professor at the Department of Horticulture, Bryansk Agricultural Institute and the 85th anniversary of the birth of V. F. Maltsev, Honored Science Worker of the Russian Federation, Doctor in Agricultural Science, professor, Head of the Department of General Agriculture and Crop Science, Bryansk State Agrarian University. Bryansk: *Bryansky GAU*, 2025. pp. 101–106. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=82514168

5. Antimonova O. N., Syrkina L. F., Antimonov A. K. Nutritional value of sugar and grain sorghum feeds in single-species and joint components. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vissheye professionalnoye obrazovaniye* = Proceedingsof Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education. 2024;(3(75)):62–70. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.32786/2071-9485-2024-03-07

6. Vaskina T. I., Kamitov Sh. S., Zaytseva O. A. Adaptability and yield of varieties sweet sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] when cultivated on gray forest soils of the bryansk region. Agroecological aspects of the sustainable development of the agroindustrial complex: Proceedings of the XVIII International scientific conference. Kokino: *Bryansky GAU*, 2021. Vol. Part 2. pp. 86–93. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=47127319

7. Dronov A. V., Belchenko D. S. The yield of feed mass of sugar sorghum (*Sorghum saccharatum* (L.) Pers) depending on the sowing density in the south-west of the Non-Black-Earth region. *Sakharnaya svekla*. 2023;(5):28–31. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.25802/SB.2023.56.52.006

8. Kapustin S. I., Volodin A. B., Kapustin A. S., Kukharuk M. Yu. Khozyaystvenno tsenniye priznaki konkursnogo ispitaniya sakharnogo sor-go. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2021;(3(89)):56–61. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.37670/2073-0853-2021-89-3-56-61

9. Sattorov B. N., Partoyev K., Kubarev E. N., Kibalnik O. P., Elanskiy S. N., Astaykina A. A. Studying of grades of the sugar sorghum in the conditions of Tajikistan. Scientific support for the sustainable development of the agro-industrial complex in the context of climate aridization: collection of materials of the III International scientific and practical conference. Saratov: *OOO Amirit*, 2023. pp. 158–162. URL: https://elibrary.ru/qmfrbm

10. Belchenko S. A., Verkholamochkin S. V., Dronov A. V., Dyachenko V. V., Sichev S. M., Malyavko G. P. Cultivation of sorghum forage crops in the conditions of the Central Non-Chernozem region. Bryansk: *Bryansky GAU*, 2025. 176 p. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=80387080

11. Chebatarev A. P., Syrkina L. F., Zharkova S. V., Volodin A. B., Pshenichnikova E. N. Assessment of agro-biological properties of varieties and lines of sugar sorghum (*Sorghum saccharatum* L. Moench) in the conditions of the forest-steppe zone of the Altai krai. *Ovoshchi Rossii* = Vegetable crops of Russia. 2025;(6):208–213. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-6-208-213

12. Ziankova N. N., Shloma T. M., Kovaliova I. V., Moiseeva M. O., Sintsarova A. M. Prospects for cultivation of sorge crops in the conditions of the Vitebsk region. *Ucheniye zapiski uchrezhdeniya obrazovaniya Vitebskaya ordena Znak pocheta gosudarstvennaya akademiya veterinarnoy meditsini*. 2022;58(3):83–87. (In Belarus). DOI: https://doi.org/10.52368/2078-0109-2022-58-3-83-87

13. Sedukova G. V., Kristova N. V. Comparative evaluation of sorghum crop herbage yield in different phases of plant development. *Zemledeliye i selektsiya v Belarusi* = Arable Farming and Plant Breeding in Belarus. 2024;(60):135–141. (In Belarus) URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=68615922

14. Bulgakova V. M., Kulikov M. A. Introduction of new sorghum forage plants into the culture of the Moscow region to increase the diversity of animal feeding diets. *Vestnik Rossiyskogo gosudarstvennogo agrarnogo zaochnogo universiteta* = Bulletin of Michurinsk State Agrarian University. 2022;(41(46)):8–12. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=48697897

15. Sukhareva L. V., Chukhina O. V. Some data on the cultivation of Sorghum Saccuratum Jakuschev using biological products in the Vologda region. Advanced scientific achievements in the dairy industry: Collection of scientific articles of the IV International scientific and practical conference, dedicated to the birthday of N. V. Vereshchagin. Vologda: *FGBOU VO Vologodskaya GMKHA im. N. V. Vereshchagina*, 2022. pp. 188–193.

16. Shkodina E. P., Balun O. V., Kapustin S. I., Volodin A. B., Kapustin A. S. Ecological variety trial of annual forage crops in the Novgorod region. International Journal of Ecosystems and Ecology Science. 2022;12(2):337–344. DOI: https://doi.org/10.31407/ijees12.204

17. Shkodina E. P. Biological basis of sorghum cultivation in the North-West of the Non-Chernozem zone. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2021;22(4):531–541. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.4.531-541

18. Romanyukin A. E., Kovtunova N. A., Shurshalin V. A., Ermolina G. M. Variability of the main elements of sweet sorghum productivity. *Zernovoye khozyaystvo Rossii* = Grain Economy of Russia. 2022;14(3):69–75. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.31367/2079-8725-2022-81-3-69-76

19. Timokhin A. Yu. The yield of sweet sorghum on various mineral nutrition backgrounds in the southern forest-steppe of Western Siberia. Youth and Science-2024: the engine of the present and the key to a successful future: Proceedings of the International scientific and practical conference. Petropavlovsk: *Severo-Kazakhstansky un-t im. M. Kozibayeva*, 2024. pp. 376–380.

20. Sedukova G. V., Kristova N. V. Influence of meteorological conditions on the yield of green mass of sugar sorghum in the phase of the beginning of panicle emission. Agroecological aspects of sustainable development of agroindustrial complex: Proceedings of the XX International Scientific Conference. Bryansk: *Bryansky GAU*, 2023. Part II. pp. 112–117. URL: https://elibrary.ru/dprpgf

21. Balun O.V., Shkodina E.P. The influence of agrometeorological factors on the duration of vegetation and yield of green mass of sorghum-sudangrass hybrid 'Navigator'. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(2):339–346. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.2.339-346

22. Balun O. V., Shkodina E. P., Zhukova S. Yu., Yakovleva V. A. The dependence of the yield of the green mass and the duration of the interphase periods of the introduced plants on the growing conditions. *Agrarnaya nauka* = Agrarian science. 2025;(8):70-77. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-397-08-70-77

Вклад авторов*:* все авторы внесли равнозначный вклад в выполнение исследований и подготовку рукописи статьи.

Сведения об авторах

✉ **Шкодина Елена Петровна**, старший научный сотрудник, ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 199178, e-mail: info@spcras.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4057-9910**,
e-mail: kriemperoal@mail.ru

Балун Ольга Васильевна, кандидат техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 199178, e-mail: info@spcras.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8476-0792

Author contributions: all authors contributed equally to the research and preparation of the manuscript.

Information about the author

✉ **Elena P. Shkodina**, senior researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 39, 14th line V.O., Saint-Petersburg, Russian Federation, 199178, e-mail: info@spcras.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4057-9910, e-mail: kriemperoal@mail.ru

Olga V. Balun, PhD in Engineering, associate professor, senior researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 39, 14th line V.O., Saint-Petersburg, Russian Federation, 199178,
e-mail: info@spcras.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8476-0792**

✉ – Для контактов / Corresponding author

КОРМОПРОИЗВОДСТВО: КОРМЛЕНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ / FODDER PRODUCTION: LIVESTOCK FEEDING

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.401–410
УДК 636.085

Возможности оперативного выявления фальсификата на рынке кормовых аминокислот

© 2026. Р. Т. Тимакова[1]✉, С. Ю. Ефремова[2]
[1]*ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет», г. Екатеринбург, Российская Федерация,*
[2]*ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», г. Пенза, Российская Федерация*

Интенсивные технологии выращивания сельскохозяйственных животных и птицы во многом определяются сбалансированностью рационов кормления по эссенциальным веществам. Определенный дефицит на отечественном кормовом рынке и недостаточный контроль за оборотом белоксодержащих кормов, в том числе кормовых аминокислот, приводит к фальсификации кормов путем замены белков и отдельных незаменимых аминокислот на более дешевые ингредиенты, что определило цель исследования – по результатам комплексного анализа кормовых аминокислот – лизина, метионина и треонина на содержание действующего вещества и сырой золы установить возможность оперативного контроля их качества. Научная значимость работы определяется обоснованием возможности выявления фальсификации кормовых аминокислот по массовой доле сырой золы. Данный метод отличается простотой испытания, в том числе для лабораторий комбикормовых заводов. В ходе эксперимента выявлено превышение нормативных значений по массовой доле сырой золы на 0,06 % в 7 промышленных образцах кормового лизина, на 0,02 % в 4 промышленных образцах метионина и на 0,15 % в 9 промышленных образцах кормового треонина из 70 исследованных образцов каждой группы. Осуществлено моделирование рецептурного состава образцов кормовых аминокислот при добавлении сыворотки молочной, муки пшеничной, соли пищевой и крахмала картофельного в количестве 2, 5 и 10 %. Во всех образцах кормовых аминокислот отмечается увеличение массовой доли сырой золы выше нормативных значений при добавлении 2 % соли пищевой и молочной сыворотки в количестве 10 % (кроме кормового метионина). При добавлении муки пшеничной и крахмала картофельного количественные показатели массовой доли сырой золы изменились незначительно. Полученные данные по повышенному содержанию золы в кормовых аминокислотах позволяют установить возможность их фальсификации в результате добавления не азотсодержащих ингредиентов.

Ключевые слова: *лизин, метионин, треонин, зола*

Благодарности: работа выполнена без финансового обеспечения в рамках инициативной тематики. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Тимакова Р. Т., Ефремова С. Ю. Возможности оперативного выявления фальсификата на рынке кормовых аминокислот. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):401–410.
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.401-410

Поступила в редакцию: 30.05.2025
Поступила после рецензирования: 24.12.2025
Принята к публикации: 03.04.2026
Опубликована онлайн: 27.04.2026

Opportunities for prompt detection of adulterated products in the feed amino acid market

© 2026. Roza T. Timakova[1]✉, Sania Yu. Efremova[2]
[1]*Ural State University of Economics, Ekaterinburg, Russian Federation*
[2]*Penza State Technological University, Penza, Russian Federation*

Intensive technologies for breeding farm animals and poultry are largely determined by the balance of feeding diets based on essential substances. A certain shortage in the domestic feed market and insufficient control over the turnover of protein-containing feeds, including feed amino acids, leads to feed adulteration by replacing proteins and individual essential amino acids with cheaper ingredients. The purpose of the research was to establish the possibility of operational quality control of feed amino acids – lysine, methionine and threonine based on the results of a comprehensive analysis for the content of active ingredient and crude ash. The scientific significance of the work is determined by the justification of the possibility of detecting adulteration of feed amino acids

by the mass fraction of crude ash. This method offers testing simplicity, making it suitable even for laboratories at feed milling plants. During the experiment, the mass fraction of crude ash exceeded the regulatory values by 0.06 % in 7 industrial samples of feed lysine, by 0.02 % in 4 industrial samples of methionine, and by 0.15% in 9 industrial samples of feed threonine, out of a total of 70 samples tested in each group. The modeling of the recipe composition of feed amino acid samples was carried out with the addition of milk whey, wheat flour, edible salt and potato starch in quantities of 2 %, 5 % and 10 %. In all samples of feed amino acids, an increase in the mass fraction of crude ash above the standard values was noted with the addition of 2 % edible salt and with the addition of 10 % milk whey (except for feed methionine). When wheat flour and potato starch were added, the quantitative indicators of crude ash mass fraction changed insignificantly. The obtained data on the increased ash content in feed amino acids indicate the possibility of adulteration through the addition of non-nitrogenous ingredients.

Keywords: *lysine, methionine, threonine, ash*

Acknowledgments: the research was carried out without financial support within the initiative topic.
The authors thank the reviewers for their contributions to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declared no conflict of interest.

For citation: Timakova R. T., Efremova S. Yu. Opportunities for prompt detection of adulterated products in the feed amino acid market**.** *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):401–410. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.401-410

Received: 30.05.2025
Revised: 24.12.2025
Accepted for publication: 03.04.2026
Published online: 27.04.2026

Использование кормовых аминокислот в рационе сельскохозяйственных животных и птицы заданной продуктивности определено необходимостью формирования сбалансированного кормового рациона по аминокислотному составу.

Аминокислоты, поступающие из полноценных кормов, представляют собой строительные блоки для синтеза полипептидов в клетках животных [1] и получения белков более высокой ценности в продукции сельскохозяйственных животных и птицы по сравнению с менее дорогими источниками кормового белка [2].

В процессе выращивания в организме животных вырабатываются сложнейшие соединения, такие как высокомолекулярные белки, нуклеиновые кислоты и т. п., но не синтезируются незаменимые аминокислоты, которые должны поступать только с кормом. Недостаток лизина вызывает снижение продуктивности, нарушение азотистого обмена и низкую эффективность кормления; эта аминокислота используется для синтеза тканей белков, усвоения кальция и выработки коллагена и эластина. Треонин принимает участие в синтезе белков, является предшественником глицина, играя определенную роль в усвояемости пищи, к ферментам метаболизма треонина относятся треонинальдолаза и треониндегидрогеназа [3].

Лизин является одной из наиболее дефицитных аминокислот в рационе свиней [4, 5, 6]. В питании птиц лизин служит эталонной аминокислотой, по отношению к которой все незаменимые аминокислоты распределяются по идеальной аминокислотной схеме [7].

Для крупного рогатого скота и птицы важнейшей лимитирующей аминокислотой является метионин, необходимый для обмена веществ в организме, роста животных и обладающий антиоксидантными свойствами. Дефицит любой незаменимой аминокислоты вызывает замедленный синтез белка и в последующем снижение продуктивности сельскохозяйственных животных. При этом для жвачных животных важен и уровень распада белка в рубце, и количество аминокислот, доставленных в тонкий кишечник [8].

В Российской Федерации (РФ) остро стоит проблема по импортозамещению кормовых добавок [9], самыми крупнотоннажными из которых являются лизин и метионин. Россия обеспечена ими лишь наполовину силами внутренних мощностей [8]. В. И. Колмаковым и А. А. Колмаковой отмечено, что тотальная зависимость от импорта кормов может привести к потере продовольственной безопасности для аквакультуры [10]. Это определяет необходимость увеличения производства отечественных кормовых добавок, используемых в животноводстве [11]. Недостаточный уровень аминокислот в рационе птиц может привести к повышенной проницаемости кишечника [12]. Среди кормовых аминокислот, которые занимают до 60 % высокомаржинального рынка кормовых добавок, 30 % приходится на метионин [13].

Качество кормовых аминокислот и премиксов зависит от ряда факторов, определяемых на предприятиях комбикормовой промышленности: вида используемого сырья и его биобезопасности; технологических особенностей формирования партий кормов для обеспечения

их однородности и соответствия рецептурному составу; осуществления регулярного партионного лабораторного контроля качества и исследования содержания основного вещества в составе товарной аминокислоты.

Важное значение имеет разработка сбалансированных рационов по лизину, метионину и триптофану, дефицит которых наблюдается в растительных кормах. Например, в таком высокобелковом сырье, как соя, недостаточное содержание метионина [14, 15], что обуславливает появление на кормовом рынке синтетических аминокислот, применяемых в качестве кормовых добавок к комбинированным кормам, и соответственно необходимость контроля за их оборотом [16].

Анализ произведенной кормовой смеси в виде микса отходов растительного сырья (отруби пшеничные 80 %) с добавлением сырья животного происхождения (продукты убоя скота 20 %) показывает на обогащение смеси минеральными веществами с повышением количества сырой клетчатки при одновременном снижении содержания лизина, сырого протеина и сырого жира относительно требований нормативов. Соответственно такой корм не является полноценным кормовым рационом без его балансирования для каждой группы животных [17].

В процессе выращивания сельскохозяйственные животные и птица нуждаются в постоянном поступлении полноценных белков, которые отличаются высокой себестоимостью. Ввиду интенсификации методов выращивания для получения высоких привесов, в составе кормов стало увеличиваться количество белковых составляющих и синтетических аминокислот, что приводит к росту расходов на корма в каждом отдельном сельхозпредприятии и одновременно к поиску более дешевых источников белка. Отмечается рост фальсификата на рынке высокобелковых кормов, в том числе таких кормовых аминокислот, как лизин, метионин и треонин.

Недобросовестные производители и поставщики кормов прибегают к разным ухищрениям для увеличения прибыли путем повышения концентрации сырого белка в кормах низкого качества или, добавляя в корм неорганические азотсодержащие соединения небелкового происхождения, чаще всего карбамид (мочевину) и сульфат аммония [18, 19, 20, 21].

Фальсификация носит системный характер с использованием физических и химических аналогов, достигая имитации питательности кормов. Наиболее известные примеры фальсификата: разбавление лизина манной крупой; сои – горохом и рапсом; рыбной муки – карбамидом, мясокостной мукой, щетиной и шкурами свиней; шрота и жмыха – карбамидом и дешевыми жирами. Ввод 1%-ной мочевины повышает содержание сырого протеина на 3 %. Из-за насыщения кормов неорганическим азотом снижается их поедаемость и среднесуточный привес животных [22]. Применение в рационе фальсификатов приводит к репутационным и экономическим потерям сельскохозяйственных предприятий.

Вопросы фальсификации обусловлены и отсутствием жестких требований нормативного характера к сырьевым компонентам кормов и конечному продукту. В то же время исследование содержания протеина в кормах относится к важному этапу анализа их качественного состава, декларируемого на уровне Федерального центра оценки безопасности и качества продукции агропромышленного комплекса.

Исследование содержания сырого протеина по методу Кьельдаля отличается своей точностью и простотой воспроизводимости содержания общего азота и относится к основному арбитражному методу в системах ASTM (*American Society for Testingand Materials*), AOAC (*Association of Official Agricultural Chemists*) и ISO (*Organization for Standardization*).

Для выявления только органического азота используется метод Барнштейна. Соответственно расчетным способом по результатам двух методов устанавливается неорганический азот.

Для исключения применения в рационах животных и птицы фальсифицированных аминокислот, что приводит к некорректным и несбалансированным рационам, необходима проверка каждой партии аминокислот на наличие действующего вещества. Для оценки полноценности белка наиболее эффективно проведение исследования аминокислотного состава и расчета аминокислотного скора.

Оценка аминокислотного состава осуществляется различными методами: капиллярный электрофорез («Капель 105М») для точного расчета и реализации современных концепций в кормлении (идеальный протеин, низкопротеиновые рационы и др.) [23]; инфракрасная спектроскопия [24]; высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ) с использо-ванием катионообменной смолы и цитратного

буфера в качестве элюента, с дериватизацией нингидрином или ортофталдиальдегидом (OPA) и детекцией с помощью фотометрического или флуоресцентного детектора [25]. Для метионина дополнительно применим йодометрический метод.

Несмотря на влияние аминокислотного состава белков кормового рациона на продуктивность животных и птицы, на животноводческих и молочно-товарных комплексах не осуществляется контроль лабораторными методами фактического содержания аминокислот в кормах и перевариваемости белка при его расщеплении в результате гидролиза пептидной связи между отдельными аминокислотами. По мнению [26], это обусловлено дороговизной лабораторных анализов по исследованию количественного и качественного состава белков, необходимостью учета и особенностями сохранения аминокислот. Например, для сохранения триптофана при кислотном гидролизе требуется определенная пробоподготовка.

Оснащение производственных лабораторий комбикормовых заводов часто не позволяет применять данные методы для определения действующих веществ. При этом во всех синтетических формах кормовых аминокислот строго регламентируется уровень массовой доли сырой золы: для лизина кормового и метионина кормового не более 0,5 %, для треонина кормового при разной массовой доле L-треонина 98,5 и 75 % – не более 0,5 и 3,0 % соответственно. Метод озоления относится к общепринятому и доступному.

Цель исследования – по результатам анализа содержания отдельных аминокислот и сырой золы в кормовых аминокислотах – лизин, метионин и треонин – установить практическую возможность выявления фальсификата кормовых аминокислот в лабораторных условиях.

Научная новизна – обоснование возможности выявления фальсификации кормовых аминокислот по содержанию сырой золы методом озоления в лабораторных условиях.

Практическая значимость – разработка рабочего инструмента для оперативного выявления фальсификата кормовых аминокислот по содержанию массовой доли золы в производственных условиях комбикормовых заводов.

Материал и методы. За период более 4 лет исследовано 210 промышленных образцов кормовых аминокислот импортного и российского производства. Отбор образцов осуществлялся ежемесячно. Проведена органолептическая оценка согласно требованиям ГОСТ Р 56913-2016[1] «Лизин кормовой. Общие технические условия», ГОСТ 23423-2017[2] «Метионин кормовой. Технические условия», ГОСТ Р 57580-2017[3] «Треонин кормовой. Технические условия». На следующем этапе промышленные образцы исследовали на содержание действующего вещества (аминокислоты) методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием в ведущих аккредитованных лабораториях РФ: ФГБУ «ВГНКИ» (Всероссийский государственный Центр качества и стандартизации лекарственных средств для животных и кормов); НИЦ «Черкизово»; ООО «ИЛ Тест-Пущино», на содержание массовой доли сырой золы методом озоления в качественных образцах аминокислот и образцах с заниженным уровнем массовой доли аминокислот по ГОСТ 32933-2014[4] «Корма, комбикорма. Метод определения содержания сырой золы».

На третьем этапе исследования было сформировано 12 групп модельных образцов каждой из кормовых аминокислот (лизин, метионин, треонин) с добавлением 2,0, 5,0 и 10,0 % сыворотки молочной, муки пшеничной, соли пищевой, крахмала картофельного в сухом виде, в которых определяли содержание сырой золы. Исследования выполнены в 3-кратной повторности. Результаты обобщали без выделения конкретных производителей и обрабатывали ретроспективным оценочным методом вариационной статистики с использованием коэффициента Стьюдента.

[1]ГОСТ Р 56913-2016. Лизин кормовой. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2020. 11 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Data/618/61891.pdf
[2]ГОСТ 23423-2017. Метионин кормовой. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2018. 39 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293739/4293739575.pdf
[3]ГОСТ Р 57580-2017. Треонин кормовой. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2017. 11 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293741/4293741625.pdf
[4]ГОСТ 32933-2014. Корма, комбикорма. Метод определения содержания сырой золы. М.: Стандартинформ, 2015. 12 с. URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293768/4293768053.pdf

Результаты и их обсуждение. На первом этапе исследований установлено, что все представленные промышленные образцы кормовых аминокислот соответствовали требованиям стандартов:

- кормовой лизин представлял собой сыпучий порошок размером от мелких до средних гранул в общей массе образца, без посторонних примесей и признаков плесени; цвет варьировал от белого до светло-коричневого; запах – слегка специфический кормовой;

- кормовой метионин – кристаллический порошок белого цвета однородного желтоватого оттенка, с легким специфическим кормовым запахом, без посторонних примесей и плесени;

- кормовой треонин – от кристаллического до мелкогранулированного порошка, без посторонних примесей и признаков плесени; цвет варьировал от белого до светло-коричневого.

Результаты второго этапа исследования без выделения образцов по производителям представлены в таблице 1.

Таблица 1 – **Содержание аминокислот и сырой золы в промышленных образцах кормовых аминокислот, % (n = 70) /**
Table 1 – **Content of amino acids and crude ash in industrial samples of feed amino acids, % (n = 70)**

Наименование аминокислоты / Name of the amino acid	*Массовая доля аминокислоты / Mass fraction of amino acid*		*Массовая доля сырой золы / Mass fraction of crude ash*		
	значение / value				
	нормативное / normative*	*фактическое (среднее) / actual (average)*	*нормативное*/ normative **	*фактическое (среднее) / actual (average)*	*фактическое (максимальное) / actual (maximum)*
Лизин кормовой / Feed lysine					
L-лизин моногидрохлорид / L-lysine monohydrochloride	78,00 не менее / 78.00 at least	78,72±0,22 / 59 образцов / 59 samples	0,50 не более / 0.50 no more than	0,17±0,05 / 58 образцов / 58 samples	0,25±0,03 / 1 образец / 1 sample
		69,01±0,26** / 11 образцов / 11 samples		0,29±0,05 / 4 образца / 4 samples	0,56±0,03** / 7 образцов / 7 samples
Метионин кормовой / Feed methionine					
Метионин / Methionine	99,00 не менее / 99.00 at least	99,11±0,02 / 64 образца / 64 samples	0,50 не более / 0.50 no more than	0,15±0,03 / 61 образец / 61 samples	0,19±0,02 / 3 образца / 3 samples
		90,95±0,14** / 6 образцов / 6 samples		0,32±0,02 / 2 образца / 2 samples	0,52±0,01** / 4 образца / 4 samples
Треонин кормовой / Feed threonine					
L-треонин 98,5 % / L-threonine 98.5 %	98,50 не менее / 98.5 at least	98,86±0,11 / 55 образцов / 55 samples	0,50 не более / 0.50 no more than	0,17±0,04 / 53 образца / 53 samples	0,25±0,02 / 2 образца / 2 samples
		89,56±0,24* / 15 образцов / 15 samples		0,33±0,06 / 6 образцов / 6 samples	0,65±0,04* / 9 образцов / 9 samples

* Названия соответствующих стандартов приведены в разделе «Материалы и методы исследования»;
**различия по отношению к нормативному значению достоверны при p≤0,05 /
* The names of the relevant standards are given in the section “Materials and Research Methods”;
** differences in relation to the standard value are significant at p≤0.05

При исследовании промышленных кормовых образцов лизина (по аминокислоте L-лизин моногидрохлорид), метионина и треонина (по аминокислоте L-треонини 98,5 %) установлено, что 84 % образцов лизина, 91 % метионина и 79 % треонина соответствуют требованиям ГОСТ Р 56913-2016, ГОСТ 23423-2017 и ГОСТ Р 57580-2017. В промышленных образцах кормовых аминокислот с пониженной массовой долей лизина, метионина и треонина, не соответствующих требованиям стандартов, выявлено недовложение химически чистых искусственных аминокислот: в кормовом лизине – на 9,71 %; в кормовом метионине – на 8,16 %;

в кормовом треонине – на 9,30 %. При этом средние значения массовой доли сырой золы в таких образцах соответствовали нормативным значениям лизина, метионина и треонина – 0,29±0,05 %, 0,32±0,020 и 0,33±0,06 %, но были выше в среднем на 0,12 %, 0,17 и 0,16 % соответственно, чем в качественных промышленных образцах кормовых аминокислот.

В то же время выявлено превышение нормативных значений по массовой доле сырой золы на 0,06 % в 7 промышленных образцах кормового лизина (10,0 %), на 0,02 % в 4 промышленных образцах метионина (5,7 %) и на 0,15 % в 9 промышленных образцах треонина (12,9 %) от исследованных.

На третьем этапе после внесения удешевляющих аминокислот в модельные образцы кормовых аминокислот на основе качественных промышленных образцов установлено, что органолептическими методами невозможна идентификация без применения микроскопирования. Результаты исследований по массовой доле сырой золы представлены в таблице 2. По результатам проведенных исследований во всех образцах кормовых аминокислот установлено увеличение содержания сырой золы.

Таблица 2 – **Содержание сырой золы в модельных образцах кормовых аминокислот (n = 12 каждого вида с добавлением дополнительных ингредиентов), % /**
Table 2 – **Content of crude ash in model samples of feed amino acids (n = 12 of each type with the additional ingredients), %**

Наименование вводимых ингредиентов / Name of the additional ingredients	*Кормовой лизин / Feed lysine*	*Кормовой метионин / Feed methionine*	*Кормовой треонин / Feed threonine*
Без добавления дополнительных ингредиентов / Without additional ingredients	0,17±0,05	0,15±0,03	0,17±0,04
С добавлением дополнительных ингредиентов / With the additional ingredients			
Сыворотка молочная 2 % / Milk whey 2 %	0,29±0,06*	0,25±0,03*	0,26±0,03*
Сыворотка молочная 5 % / Milk whey 5 %	0,38±0,08*	0,32±0,04*	0,34±0,03*
Сыворотка молочная 10 % / Milk whey 10 %	0,54±0,08*	0,49±0,05*	0,53±0,06*
Мука пшеничная 2 % / Wheat flour 2 %	0,19±0,02*	0,17±0,01*	0,18±0,02*
Мука пшеничная 5 % / Wheat flour 5 %	0,24±0,04*	0,22±0,01*	0,23±0,01*
Мука пшеничная 10 % / Wheat flour 10 %	0,28±0,05*	0,24±0,02*	0,26±0,02*
Соль пищевая 2 % / Food salt 2 %	2,33±0,17*	1,77±0,12*	2,15±0,12*
Соль пищевая 5 % / Food salt 5 %	5,29±0,26*	5,12±0,18*	5,17±0,15*
Соль пищевая 10 % / Food salt 10 %	10,21±0,54*	10,10±0,41*	10,15±0,47*
Крахмал картофельный 2 % / Potato starch 2 %	0,18±0,01*	0,16±0,01*	0,18±0,01*
Крахмал картофельный 5 % / Potato starch 5 %	0,20±0,02*	0,18±0,01*	0,20±0,02*
Крахмал картофельный 10 % / Potato starch 10 %	0,23±0,02*	0,21±0,01*	0,22±0,02*

* Различия с модельными образцами кормовых аминокислот без добавления дополнительных ингредиентов достоверны при $p \leq 0,05$ /

* Differences with model samples of feed amino acids without additional ingredients are significant at *$p \leq 0.05$

В результате моделирования рецептурного состава образцов кормовых аминокислот при добавлении используемых недобросовестными производителями ингредиентов в разном процентном соотношении (2, 5 и 10 %) для снижения производственной себестоимости установлена прямо пропорциональная зависимость увеличения массовой доли золы от доли добавляемого ингредиента. Наиболее чувствительным к добавлению сторонних ингредиентов определен кормовой лизин, далее по уменьшению чувствительности – кормовой треонин и кормовой метионин. Во всех образцах кормовых аминокислот в модельных образцах при добавлении 2 % соли пищевой отмечено увеличение массовой доли сырой золы выше нормативных значений: до 2,33±0,17 % кормового лизина, до 1,77±0,12 % – кормового метионина, до 2,15±0,12 % – кормового треонина. При добавлении сыворотки молочной 10 % превышение нормативных показателей массовой доли золы наблюдается в кормовом лизине и кормовом треонине.

Полученный результат по кормовому метионину (0,49±0,05 %) можно считать критическим. При добавлении крахмала картофельного и муки пшеничной в количестве до 10 % не установлено превышения показателей массовой доли влаги.

Заключение. По результатам проведенных исследований кормовых аминокислот (лизин, метионин, треонин) отечественных и зарубежных производителей по массовой доле сырой золы установлены факты фальсификации на 0,06 % в 7 промышленных образцах кормового лизина, на 0,02 % в 4 промышленных образцах кормового метионина и на 0,15 % в 9 промышленных образцах кормового треонина из 70 исследованных образцов по каждому виду кормовых аминокислот путем добавления не азотсодержащих ингредиентов для удешевления производственной себестоимости.

Опытным путем установлено, что в образцах аминокислот с низким содержанием действующего вещества, ниже заявленного согласно ГОСТ к соответствующей аминокислоте, содержание массовой доли сырой золы выше, чем в качественных промышленных образцах кормовых аминокислот. В образцах аминокислот, где установлены факты фальсификации, содержание массовой доли сырой золы варьирует от 0,52±0,01 до 0,65±0,04 %.

В условиях невозможности идентификации фальсификата кормовых аминокислот по внешнему виду в результате введения нерецептурных удешевляющих ингредиентов и отсутствия доступных методов исследования в лабораториях комбикормовых заводов к критериальному признаку качественности кормовых аминокислот можно отнести увеличенный относительно средних уровней показатель массовой доли сырой золы, установленный общеизвестным методом озоления. Предложенный подход является первичным лабораторным методом для контроля качества кормовых аминокислот и снижения вероятности применения в рационах фальсифицированных некачественных продуктов, влияющих на эффективность выращивания сельскохозяйственных животных и птицы. Экспериментальные исследования требуют дальнейшего продолжения.

Список литературы

1. Ji Yu., Hou Yu., Blachier F., Wu Z. Editorial: Amino acids in intestinal growth and health. Frontiers in Nutrition. 2023;10:1172548. DOI: https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1172548

2. Selle P. H., Macelline S. P., Chrystal P. V., Liu S. Yu. The impact of digestive dynamics on the bioequivalence of amino acids in broiler chickens. Frontiers in Bioscience-Landmark. 2022;27(4):126. DOI: https://doi.org/10.310283/j.fbl2704126

3. Каримова М. О., Иргашев Т. А., Байгенов Ф. Н., Косилов В. И., Ребезов М. Б. Метаболизм незаменимых аминокислот в организме телят под влиянием кормовой добавки. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2020;(4(84)):302–306. Режим доступа: https://elibrary.ru/iujjpa EDN: IUJJPA

4. Hong J., Kim H.-S., Do S., Kim H.-J., Kim S.-W., Jang S.-K., Kim Y.-Y. Effects of lysine cell mass supplementation as a substitute for L-Lysine HCL on growth performance, diarrhea incidence and blood profiles in weaning pigs. Animals. 2021;11(7):2092. DOI: https://doi.org/10.3390/ani11072092

5. Hu X., Huo B., Jang J., Wang K., Huang L., Che L. et al. Effects of dietary lysine levels on growth performance, nutrient digestibility, serum metabolites and meat quality of bagingpigs. Animals (Basel). 2022;12(15):1884. DOI: https://doi.org/10.3390/ani12151884

6. Еримбетов К. Т., Обвинцева О. В., Михайлов В. В. Метаболистические и физиологические функции лизина и его производных у моногастичных животных (обзор). Проблемы биологии продуктивных животных. 2022;(4):31–48. DOI: https://doi.org/10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2022.4.31-48 EDN: MREHVI

7. Maynard C. W., Liu S. Y., Lee J. T., Caldas J., Dirhl E. J. J., Rochell S. L., Kidd M. T. Determining the 4th limiting amino acid in low crude protein diets for male and female Cobb MV × 500 broilers. British Poultry Science. 2020;61(6):695–702. DOI: https://doi.org/10.1080/00071668.2020.1782348

8. Ветвицкая А. «Поиск баланса»: применение кормовых аминокислот в животноводстве. Эффективное животноводство. 2020;(9(166)):75–81. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=44589189 EDN: FBVICU

9. Лещуков К. А., Масалов В. Н., Катальникова М. А. Влияние скармливания кормовой добавки с защищенными аминокислотами и гепатопротектором на продуктивность коров и качество молока. Вестник аграрной науки. 2023;(3(102)):27–35. DOI: https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2023.3.27 EDN: JYUUVG

10. Колмаков В. И., Колмакова А. А. Аминокислоты в перспективных кормах для аквакультуры рыб: обзор экспериментальных данных. Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2020;13(4):424–442. DOI: https://doi.org/10.17516/1997-1389-0332 EDN: EZXKXZ

11. Седых В. А., Суглобов А. Е. Обеспечение продовольственной безопасности на основе развития импортозамещающих производств лизина и других аминокислот методом ферментации. Russian Journal of Management. 2024;12(1):28–36. DOI: https://doi.org/10.29039/2409-6024-2024-12-1-28-36 EDN: UCPTJR

12. Chrystal P. V., Moss A. F., Khoddami A., Naranjo V. D., Selle P. H., Liu S. Y. Impacts of reduced-crude protein diets on key parameters in male broiler chickens offered maize-based diets. Poultry Science. 2020;99(1):505–516. DOI: https://doi.org/10.3382/ps/pez573

13. Глотова И. А., Шахов С. В., Молоканова Л. В., Пугачева И. Н., Куцова А. Е. Подходы к обеспечению экологической эффективности производства кормового метионина. Технологии и товароведение сельскохозяйственной продукции. 2022;1(18):20–30.
DOI: https://doi.org/10.53914/issn2311-6780_2022?1_20 EDN: DKCUWI

14. Зимина М. И., Носкова С. Ю., Ульрих Е. В., Афанасьева К. С., Федотовских Н. С., Кригер О. В. Особенности получения кормовых аминокислот при культивировании коринебактерий на соевой мелассе. Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2022;(3):68–92. DOI: https://doi.org/10.5922/gikbfu-2022-3-5 EDN: YIIPFR

15. Janocha A., Milczarek A., Pietrusiak D., Laski K., Saleh M. Efficiency of Soybean Products in Broiler Chicken Nutrition. Animals. 2022;12(3):294. DOI: https://doi.org/10.3390/ani12030294

16. Сложенкина М. И., Горлов И. Ф., Кротова О. Е., Комарова З. Б., Черняк А. А. Биоконверсия кормов и качество мяса свиней под воздействием синтетических аминокислот. Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2020;(1(57)):239–248.
DOI: https://doi.org/10.32786/2071-9485-2020-01-24 EDN: SCTDVI

17. Иванова И. Е., Пунегова В. В., Ковалева О. В. Оценка состава и питательной ценности кормовой смеси на основе отходов боен. Мир инноваций. 2022;(4(23)):36–40.
Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=65448593 EDN: DGKEUK

18. Beia S. I., Bran M., Petrescu I., Beia V. E., Dinu M. Food fraud incidents: findings from the latest rapid alert system for food and feed (rasff) Report. Scientific Papers. Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development. 2020;20(2):45–52. URL: https://managementjournal.usamv.ro/pdf/vol.20_2/Art5.pdf

19. Штенина Д. В. Значение кормов и их компонентов при выращивании рыбы. Вестник науки и образования. 2022;(1-2(121)):31–33. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=48000496 EDN: EHHOPW

20. Алифанов С. В., Есаулова Л. А. Эффективность кормления коров красно-пёстрой породы разных линий в ЗАО «Юдановские просторы» Бобровского района Воронежской области. Технологии и товароведение сельскохозяйственной продукции. 2023;(2(21)):22–35. DOI: https://doi.org/10.53914/issn2311-6870_2023_2_22 EDN: HJMSAI

21. Полубесова М. А., Журавлева А. З., Рябухин Д. С. Насекомые как альтернативная замена источника белка в рационе цыплят-бройлеров. Все о мясе. 2023;(3):58–63.
DOI: https://doi.org/10.21323/2071-2499-2023-3-58-63 EDN: PAIQTX

22. Фоменко П. А., Богатырева Е. В. Причины фальсификации сырого протеина в кормах и способы ее выявления. Молочнохозяйственный вестник. 2022;(1(45)):143–154.
DOI: https://doi.org/10.52231/2225-4269_2021_3_143 EDN: EWPBPM

23. Капитонова Е. А., Янченко В. В. Определение аминокислотного состава Определение аминокислотного состава регуляторного комплекса «Байпас» методом капиллярного электрофореза. Вестник АПК Верхневолжья. 2021;(1(53)):52–56. DOI: https://doi.org/10.35694/YARCX.2021.53.1.009 EDN: KWDSZE

24. Buryakov N. P., Buryakova M. A., Shapovalov S. O., Kornilova E. V., Palamarchuk D. V., Zhuravlev A. E. et al. Application of near infrared spectroscopy for identification and quantitative determination of amino acids in their crystalline and salt forms in the preparation of animal feed. Agrarian Science. 2023;(12):90–94.
DOI: https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-377-12-90-94 EDN: EADLBR

25. Тимакова Р. Т., Ильюхина Ю. В., Старцев В. Г. Оценка сбалансированности аминокислотного состава белка сухого кобыльего молока. Пищевая промышленность. 2023;(8):16–21.
DOI: https://doi.org/10.52653/PPI.2023.8.8.003 EDN: XPULZQ

26. Рядчиков В. Г., Вороков В. Х., Шляхова О. Г., Дмитриенко С. Н. Определение аминокислотного профиля кормов, используемых на МТФ Краснодарского края. Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2020;163:192–212.
DOI: https://doi.org/10.21515/1990-4665-163-016 EDN: NLJWPF

References

1. Ji Yu., Hou Yu., Blachier F., Wu Z. Editorial: Amino acids in intestinal growth and health. Frontiers in Nutrition. 2023;10:1172548. DOI: https://doi.org/10.3389/fnut.2023.1172548

2. Selle P. H., Macelline S. P., Chrystal P. V., Liu S. Yu. The impact of digestive dynamics on the bioequivalence of amino acids in broiler chickens. Frontiers in Bioscience-Landmark. 2022;27(4):126.
DOI: https://doi.org/10.310283/j.fbl2704126

3. Karimova M. O., Irgashev T. A., Baygenov F. N., Kosilov V. I., Rebezov M. B. Metabolism of essential amino acids in the calf body under the influence of the fodder additive. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2020;(4(84)):302–306. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/iujjpa

4. Hong J., Kim H.-S., Do S., Kim H.-J., Kim S.-W., Jang S.-K., Kim Y.-Y. Effects of lysine cell mass supplementation as a substitute for L-Lysine HCL on growth performance, diarrhea incidence and blood profiles in weaning pigs. Animals. 2021;11(7):2092. DOI: https://doi.org/10.3390/ani11072092

5. Hu X., Huo B., Jang J., Wang K., Huang L., Che L. et al. Effects of dietary lysine levels on growth performance, nutrient digestibility, serum metabolites and meat quality of bagingpigs. Animals (Basel). 2022;12(15):1884. DOI: https://doi.org/10.3390/ani12151884

6. Erimbetov K. T., Obvintseva O. V., Mikhaylov V. V. Metabolic and physiological functions of lysine and its derivatives in monogastric animals: a review. *Problemi biologii produktivnikh zhivotnikh* = Problems of Productive Animal Biology. 2022;(4):31–48. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2022.4.31-48

7. Maynard C. W., Liu S. Y., Lee J. T., Caldas J., Dirhl E. J. J., Rochell S. L., Kidd M. T. Determining the 4th limiting amino acid in low crude protein diets for male and female Cobb MV × 500 broilers. British Poultry Science. 2020;61(6):695–702. DOI: https://doi.org/10.1080/00071668.2020.1782348

8. Vetvitskaya A. "The search for balance": the use of feed amino acids in animal husbandry. *Effektivnoye zhivotnovodstvo*. 2020;(9(166)):75–81. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=44589189

9. Leshchukov K. A., Masalov V. N., Katalnikova M. A. The effect of feeding a feed additive with protected amino acids and a hepatoprotector on cow productivity and milk quality. *Vestnik agrarnoy nauki* = Bulletin of Agrarian Science. 2023;(3(102)):27–35. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2023.3.27

10. Kolmakov V. I., Kolmakova A. A. Amino acids in prospective feeds for fish aquaculture: a review of experimental data. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Biologiya* = Journal of Siberian Federal University. Biology. 2020;13(4):424–442. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.17516/1997-1389-0332

11. Sedikh V. A., Suglobov A. E. Ensuring food security on the basis of lysine and other amino acids import-substituting production development using the fermentation method. Russian Journal of Management. 2024;12(1):28–36. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.29039/2409-6024-2024-12-1-28-36

12. Chrystal P. V., Moss A. F., Khoddami A., Naranjo V. D., Selle P. H., Liu S. Y. Impacts of reduced-crude protein diets on key parameters in male broiler chickens offered maize-based diets. Poultry Science. 2020;99(1):505–516. DOI: https://doi.org/10.3382/ps/pez573

13. Glotova I. A., Shakhov S. V., Molokanova L. V., Pugacheva I. N., Kutsova A. E. Approaches to ensuring ecological efficiency of feed methionine production. *Tekhnologii i tovarovedeniye selskokhozyaystvennoy produktsii*. 2022;1(18):20–30. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.53914/issn2311-6780_2022?1_20

14. Zimina M. I., Noskova S. Yu., Ulrikh E. V., Afanasyeva K. S., Fedotovskikh N. S., Kriger O. V. Peculiarities of obtaining fodder amino acids when culturing corynebacterium on soybean melasse. *Vestnik Baltiyskogo federalnogo universiteta im. I. Kanta. Seriya: Yestestvenniye i meditsinskiye nauki* = IKBFU's Vestnik. Series: Natural and Medical Sciences. 2022;(3):68–92. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.5922/gikbfu-2022-3-5

15. Janocha A., Milczarek A., Pietrusiak D., Laski K., Saleh M. Efficiency of Soybean Products in Broiler Chicken Nutrition. Animals. 2022;12(3):294. DOI: https://doi.org/10.3390/ani12030294

16. Slozhenkina M. I., Gorlov I. F., Krotova O. E., Komarova Z. B., Chernyak A. A. Feed bioconversion and quality of pig meat under the influence of synthetic amino acids. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vissheye professionalnoye obrazovaniye* = Proceedingsof Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education. 2020;(1(57)):239–248. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.32786/2071-9485-2020-01-24

17. Ivanova I. E., Punegova V. V., Kovaleva O. V. Evaluation of the composition and nutritional value of the feed mixture based on slaughterhouse waste. *Mir innovatsy* = World of innovation. 2022;(4(23)):36–40. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=65448593

18. Beia S. I., Bran M., Petrescu I., Beia V. E., Dinu M. Food fraud incidents: findings from the latest rapid alert system for food and feed (rasff) Report. Scientific Papers. Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development. 2020;20(2):45–52. URL: https://managementjournal.usamv.ro/pdf/vol.20_2/Art5.pdf

19. Shtenina D. V. Meaning of feeds and its components at fish farming. *Vestnik nauki i obrazovaniya*. 2022;(1-2(121)):31–33. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=48000496

20. Alifanov S. V., Esaulova L. A. The effectiveness of feeding red-mottled cows of different lines in ZAO "Yudanovsky expanses" of the Bobrovsky district of the Voronezh region. *Tekhnologii i tovarovedeniye selskokhozyaystvennoy produktsii*. 2023;(2(21)):22–35. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.53914/issn2311-6870_2023_2_22

21. Polubesova M. A., Zhuravleva A. Z., Ryabukhin D. S. Insects as an alternative substitute for protein sources in a diet of broiler chickens. *Vse o myase*. 2023;(3):58–63. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21323/2071-2499-2023-3-58-63

22. Fomenko P. A., Bogatireva E. V. Reasons for raw protein falsification in feeds and methods of its detection. *Molochnokhozyaystvenny vestnik*. 2022;(1(45)):143–154. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.52231/2225-4269_2021_3_143

23. Kapitonova E. A., Yanchenko V. V. Amino acid composition determination of the regulatory complex "Baipas" by capillary electrophoresis method. V*estnik APK Verkhnevolzhya* = Bulletin of the AIC of the Upper Volga. 2021;(1(53)):52–56. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.35694/YARCX.2021.53.1.009

24. Buryakov N. P., Buryakova M. A., Shapovalov S. O., Kornilova E. V., Palamarchuk D. V., Zhuravlev A. E. et al. Application of near infrared spectroscopy for identification and quantitative determination of amino acids in their crystalline and salt forms in the preparation of animal feed. Agrarian Science. 2023;(12):90–94.
DOI: https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-377-12-90-94

25. Timakova R. T., Ilyukhina Yu. V., Startsev V. G. Evaluation of the balance of amino acid composition of dry mare's milk protein. *Pishchevaya promishlennost'* = Food Industry. 2023;(8):16–21. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.52653/PPI.2023.8.8.003

26. Ryadchikov V. G., Vorokov V. Kh., Shlyakhova O. G., Dmitriyenko S. N. Determination of the amino acid profile of feed used at milk farms in the Krasnodar region. *Politematichesky setevoy elektronny nauchny zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University. 2020;163:192–212. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21515/1990-4665-163-016

Вклад авторов: Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Сведения об авторах

✉ **Тимакова Роза Темерьяновна**, доктор техн. наук, доцент, профессор кафедры биотехнологии и инжиниринга, ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет», ул. 8 Марта/Народной воли, 62/45, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620144, e-mail: usue@usue.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4777-1465, e-mail: trt64@mail.ru

Ефремова Сания Юнусовна, доктор биол. наук, профессор, профессор кафедры «Биотехнология и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет», проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11, г. Пенза, Российская Федерация, 440039, e-mail: politeh@pnzgu.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9520-4094

Author contributions: All authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Information about the authors

✉ **Roza T. Timakova**, DSc in Engineering, associate professor, professor at the Department of Biotechnology and Engineering, Ural State University of Economics, 62/45, 8 Marta/Narodnoy Voli str., Yekaterinburg, Russian Federation, 620144, e-mail: usue@usue.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4777-1465**, e-mail: trt64@mail.ru

Sania Yu. Efremova, DSc in Biology, professor, professor at the Department of Biotechnology and Technosphere Safety, Penza State Technological University, 1a/11, Baidukov proyezd / Gagarin str., Penza, Russian Federation, 440039, e-mail: politeh@pnzgu.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9520-4094**

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.411–424
УДК 636.082

(cc) BY

Роль полиморфизма гена *IGF1* в предрасположенности коров к кетозу

© 2026. К. Д. Чаицкая✉, А. А. Чаицкий, П. О. Щеголев, А. А. Королев, В. А. Дуркина
ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия», г. Кострома, Российская Федерация

В статье приводятся результаты исследования 2024 года по определению влияния полиморфизма гена IGF1 на предрасположенность коров к кетозу. Объектом исследования послужили новотельные коровы костромской породы племенных хозяйств Костромской области (n = 127). В первые 10 дней после отела у клинически здоровых коров проводили анализ периферической крови на содержание кетоновых тел, вследствие чего разделили животных на 1-ю и 2-ю группы с содержанием кетоновых тел 0–1,2 ммоль/л и выше 1,2 ммоль/л соответственно. Из цельной крови подопытных животных выделяли образцы ДНК и проводили их генотипирование по локусу rs109763947 гена IGF1 методом полимеразной цепной реакции в реальном времени (ПЦР-РВ) с плавлением флуоресцентных зондов. Установлено, что исследуемая популяция скота полиморфна по локусу IGF1 и характеризуется полным отсутствием носителей генотипа AA, преобладанием и статистически значимым (P<0,001) избытком гетерозигот AG (0,551–0,714), сопровождающихся повышенным на 0,05 ммоль/л уровнем кетоновых тел в крови (P<0,001) и положительной корреляцией концентрации кетонов в крови с содержанием белка в молоке (r_{ho} = 0,349, P<0,05), что указывает на возможное селекционное преимущество гетерозигот. Частота аллеля A в 1-й группе оказалась на 0,078 меньше, чем во 2-й (P<0,001), что согласуется с тенденцией носительниц аллеля A попадать в группу здоровых животных в 2,06 раза реже, чем в группу коров с субклиническим кетозом. Однако соотношение шансов для данных событий незначимо, а высокое значение коэффициента вариации уровня кетоновых тел среди коров-носительниц генотипов AG и GG 2-й группы (43,05 и 64,40 % соответственно) по сравнению с 1-й (5,60 и 5,96 % соответственно), свидетельствует о влиянии на предрасположенность к кетозу других генетических факторов, что говорит о необходимости изучения локуса rs109763947 в комплексе с другими ДНК-маркерами.

Ключевые слова: *крупный рогатый скот, костромская порода, ген инсулиноподобного фактора роста, ПЦР в реальном времени, кетоновые тела*

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-76-00006, https://rscf.ru/project/22-76-00006/

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Чаицкая К. Д., Чаицкий А. А., Щеголев П. О., Королев А. А., Дуркина В. А. Роль полиморфизма гена *IGF1* в предрасположенности коров к кетозу. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):411–424. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.411-424

Поступила в редакцию: 27.05.2025
Доработана после рецензирования: 24.09.2025
Принята к публикации: 03.04.2026
Опубликована онлайн: 27.04.2026

The role of *IGF1* gene polymorphism in predisposition of cows to ketosis

© 2026. Kseniya D. Chaitskaya✉ , Alexey A. Chaitskiy, Pavel O. Schiogolev, Anton A. Korolev, Viktoriya A. Durkina
Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma, Russian Federation

The article presents the results of the study conducted in 2024 to determine the effect of IGF1 gene polymorphism on the predisposition of cows to ketosis. The objects of the study were first-calving cows of the Kostroma breed from pedigree farms in the Kostroma region (n = 127). In the first 10 days after calving, peripheral blood in clinically healthy cows was analyzed for ketone bodies. As a result, the animals were divided into groups 1 and 2 with 0-1.2 mmol/l ketone body content and above 1.2 mmol/l, respectively. The samples of DNA were isolated from the whole blood of experimental animals and genotyping was performed at the rs109763947 locus of the IGF1 gene by real-time polymerase chain reaction (RT PCR) with melting of fluorescent probes. It has been established that the studied cattle population is polymorphic at the IGF1 locus and is characterized by the complete absence of AA genotype carriers, the predominance and statistically significant (P<0.001) excess of AG heterozygotes (0.551–0.714), accompanied by an increased level of ketone bodies in the blood by 0.05 mmol/l (P<0.001) and a positive correlation of the concentration of ketones in the blood with a protein content in milk (r_{ho} = 0.349,

P<0.05), which indicates a possible breeding advantage of heterozygotes. The frequency of the A allele in group 1 was 0.078 less than in group 2 (P<0.001), which corresponded with the entry trend of A carriers to healthy group 2.06 times less often than to the group with subclinical ketosis. However, the odds ratio for these events is not significant, and the high coefficient of variation in ketone body levels among AG and GG carriers in group 2 (43.05 and 64.4 %, respectively) compared with group 1 (5.6 and 5.96 %, respectively) indicates the influence of other genetic factors on the predisposition to ketosis. This indicates the necessity to study the rs109763947 locus in combination with other DNA markers.

Keywords: *cattle, Kostroma breed, insulin-like growth factor gene, RT PCR, ketones*

Acknowledgements: the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-76-00006, https://rscf.ru/project/22-76-00006/.

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors stated no conflict of interest.

For citation: Chaitskaya K. D., Chaitskiy A. A., Schiogolev P. O., Korolev A. A., Durkina V. A. The role of *IGF1* gene polymorphism in predisposition of cows to ketosis. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):411–424. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.411-424

Received: 27.05.2025
Revised: 24.09.2025
Accepted for publication: 03.04.2026
Published online: 27.04.2026

Система регуляции белкового обмена млекопитающих, известная как соматотропиновый каскад, построена на цепочке процессов, в которые вовлечены белки, похожие по структуре и действию на инсулин и релаксин – инсулиноподобные факторы роста (IGF). Процесс начинается в гипофизе, где гипофизарный фактор роста (Pit1) запускает производство гормонов соматотропина (гормон роста, GH) и пролактина (PRL). Когда гормон роста попадает в кровь, он взаимодействует со специфическими рецепторами (GHR) на поверхности клеток-мишеней. Далее в действие вступают инсулиноподобные факторы роста – IGF1 и IGF2 – преимущественно синтезирующиеся в печени и играющие роль посредников, напрямую участвующих в обменных процессах внутри клеток-мишеней. Именно благодаря IGF1 и IGF2 реализуется влияние соматотропина на процесс образования молока у млекопитающих [1, 2].

Единственная полипептидная цепь белка IGF1 состоит из 70 аминокислот и слабо вариабельна у большинства изученных видов млекопитающих. Как и инсулин, IGF1 при контакте с рецепторами мышечных клеток стимулирует в них транспорт аминокислот и глюкозы, повышая чувствительность клеток к инсулину, а при воздействии на клетки жировой ткани – перенос и окисление глюкозы до CO_2, а также включение глюкозы в липиды [1].

Ген инсулиноподобного фактора роста 1 (*IGF1*) определяет рост, развитие и дифференциацию клеток тканей-мишеней (в т. ч. молочной железы), а также участвует в реализации различных физиологических функций (например, лактации), что характеризует его действие как плейотропное [3]. Ученым Дж. Ким (J. W. Kim) [4] была установлена корреляция между углеводным, липидным, белковым метаболизмом и синтезом IGF1.

Инсулин является ключевым метаболическим гормоном и показателем энергетического статуса, действуя в петле обратной связи, где неэтерифицированные жирные кислоты и кетоновые тела стимулируют его секрецию, а он затем подавляет образование большего количества кетоновых тел [1]. У лактирующих молочных коров обычно снижен уровень инсулина в крови для поддержания лактации. Заболевания, связанные с нарушением энергетического баланса, такие как кетоз, были сопряжены с инсулинорезистентным состоянием у молочных коров в предродовой период [5, 6].

Ген инсулиноподобного фактора роста 1 рассматривается как ДНК-маркер, ассоциированный, с одной стороны, с уровнем молочной продуктивности и химическим составом молока, с другой – с регуляцией метаболических процессов в организме, что может быть полезным при селекции скота на резистентность к нарушениям обмена веществ [7, 8].

Впервые полиморфизм SnaBI гена *IGF1*, расположенный в 5′-нетранслируемой области, был выявлен W. Ge с соавторами в 1997 г. при помощи рестриктазы SnaBI. В дальнейшем, данный полиморфизм был определен как замена T/C в положении 472 относительно старта транскрипции (положение 512 после ATG кодона последовательности AF210383 в GenBank), с соответствующими аллелями: референсным *A* (нуклеотид T) и мутантным *B* (нуклеотид C) [2, 9].

Частота генотипов и аллелей гена *IGF1* в разрезе разных пород крупного рогатого скота представлена в таблице 1.

Таблица 1 – **Частота генотипов *IGF1* у разных пород крупного рогатого скота /**
Table 1 – **Frequency of IGF1 genotypes in cattle of different breeds**

Порода / Breed	*Распределение по генотипам, % / Distribution by genotypes, %*			*Частота аллелей / Allele frequency*		*Источник / Reference*
	AA	*AB*	*BB*	*A*	*B*	
Аулиекольская / Auliekolsky	20,5	43,2	36,2	0,387	0,613	[10]
Казахская белоголовая / Kazakh Whiteheaded	6,0	52,0	42,0	0,338	0,662	
	22,0	32,0	46,0	0,450	0,550	[11]
Герефордская / Hereford	10,0	58,0	32,0	0,260	0,740	
	10,5	31,6	57,9	0,263	0,737	[12]
Голштинская турецкой селекции / Turkish Holstein	24,6	53,2	22,7	0,533	0,487	[13]
Голштинская китайской селекции / Chinese Holstein	16,8	54,2	29,0	0,439	0,561	[14]
Черно-пестрая / Russian Black-and-White	28,6	52,4	19,0	0,550	0,450	[15]
Турецкая серая степная / Turkish Grey Steppe	5,1	46,7	48,2	0,285	0,715	[16]
Анатолийская черная / Anatolian Black	-	51,4	48,6	0,257	0,743	
Южно-анатолийская красная / South Anatolian Red	4,0	23,2	72,8	0,156	0,844	
Шароле / Charolais	20,8	50,0	29,2	0,460	0,540	[17]
Бифмастер / Beefmaster	-	6,7	93,3	0,030	0,970	

Согласно результатам исследований различных отечественных и зарубежных авторов, наиболее распространен генотип *AB* гена *IGF1*. Встречаемость гомозиготных генотипов отличается в зависимости от направления продуктивности. Так, среди коров молочного направления наиболее распространен гомозиготный генотип *AA*, а среди пород мясного типа – генотип *BB* (табл. 1).

Исследования показали, что предпочтительный аллель SnaBI $IGF1^{B}$ оказывает положительное влияние не только на величину удоя, жирномолочность и белковомолочность коров, но и на прирост живой массы. Например, Х. Ф. Рейна с соавторами (X. F. Reyna et al.) установили ассоциацию аллельного варианта $IGF1^{BB}$ с повышением прироста живой массы у скота породы бифмастер, что указывает на участие данного гена в метаболических процессах коров [18]. В поздних опытах на бычках и телочках казахской белоголовой породы (Н. П. Герасимов и др. (N. P. Gerasimov et al.), 2023) более высокой интенсивностью роста и увеличенными линейными размерами тела обладали гетерозиготные особи, но большей эффективностью отличались животные с генотипом *BB* [19]. В исследованиях на голштинских коровах Ахмед А. Салех и др. (Ahmed A. Saleh et al., 2024) отмечали больший удой у носительниц генотипа *AG*, но наибольшее содержание жира и белка – у генотипа *GG* [20].

Джей Пи Лайрон с соавторами (J. P. Lirón et al.) выявили, что *IGF1* является регулятором наступления половой зрелости у бычков абердин-ангусской породы и участвует в событиях, которые предшествуют и инициируют половое созревание [21].

В работе коллектива Р. Соарес и соавторов (R. Soares et al.) была установлена ассоциативная связь концентрации белка IGF1 с развитием кетоза на поздних стадиях лактации, как в клинической, так и в субклинической форме. Авторами предложено использовать данный показатель как биомаркер, позволяющий определить развитие кетоза на ранних стадиях [22].

Экспрессия гена *IGF1* происходит во многих тканях организма и может оказывать влияние на клеточную пролиферацию, дифференцировку и метаболическую активность. Также сообщалось, что экспрессия *IGF1* оказывает положительное влияние на выработку эстрадиола яичниками (Джорритсма и др.

(Jorritsma et al., 2003). Однако, как сообщается авторами, необходимы дальнейшие исследования, чтобы подтвердить роль вновь выявленных однонуклеотидных полиморфизмов (*Single Nucleotide Polymorphism*, SNP) для предрасположенности к кетозу [23].

Таким образом, ген *IGF1* оказывает влияние на продуктивность, воспроизводительную функцию и обмен веществ у коров. Дальнейшее изучение данного гена позволит выявить ассоциативные связи генотипов и устойчивости или предрасположенности к различным заболеваниям обмена веществ.

Цель исследований – изучить полиморфизм гена *IGF1* у коров костромской породы и определить его связь с предрасположенностью к кетозу.

Научная новизна – определение SNP *IGF1* методом полимеразной цепной реакции в реальном времени (ПЦР-РВ) с детекцией результатов гибридизационно-флуоресцентным способом.

Материал и методы. Объектом исследования послужили коровы костромской породы из племенных хозяйств Костромской области АО «Племзавод «Караваево» (n = 108) и ООО «Минское» (n = 19) в период первой лактации. Фенотипические данные зоотехнического и ветеринарного учета животных были извлечены из баз данных ИАС «СЕЛЭКС» (Россия) и «М-комплекс» (Россия) соответственно.

В первые 10 дней после отела у коров, не имеющих клинических признаков кетоза, определяли концентрацию кетоновых тел в крови с помощью прибора «TIADOC-4235E» (Тайвань). По результатам анализа из подопытных животных было сформировано две группы: 1 – коровы с содержанием кетоновых тел 0–1,2 ммоль/л; 2 – с концентрацией кетонов более 1,2 ммоль/л (субклинический кетоз).

Генетические исследования проводили на биологическом материале (цельная кровь), отобранном у подопытных коров из хвостовой вены в предварительно промаркированные вакуумные пробирки, содержащие антикоагулянт ЭДТА К2 (Германия). Извлечение ДНК из биоматериала проводилось сорбентным методом с применением набора реактивов ПРОБА-ГС-ГЕНЕТИКА (Россия). Полученные образцы ДНК были учтены в базе данных лаборатории, зашифрованы и заложены на хранение в морозильную камеру при температуре -40 °С.

Разработку тест-системы для определения полиморфизма в локусе *rs109763947* гена *IGF1* вели с использованием биоинформатических баз данных Ensembl и NCBI. Для общего планирования и визуализации расположения олигонуклеотидных праймеров и зондов применяли ПО Unipro UGENE версия 50.0 (Россия), точный подбор олигонуклеотидов и моделирование полимеразной цепной реакции (ПЦР) *in silico* – ПО Oligo версия 6.31 (США). Праймеры и зонды, входящие в состав тест-системы, синтезированы в аккредитованной биосинтетической компании (Россия), апробация тест-системы и контроль качества образцов ДНК осуществлялась путем проведения ПЦР и последующего гель-электрофореза в агаровом геле.

Детекция полиморфизма *rs109763947* гена *IGF1* проводилась путем ПЦР в реальном времени с применением гибридизационных зондов, меченных флуоресцирующими красителями. Амплификация ДНК и оптическая регистрация изменения флуоресценции проводилась с помощью детектирующего аплификатора «ДТпрайм» (Россия), с отжигом праймеров при температуре +59 ºС. Для детекции аллелей целевого локуса по принципу примыкающих зондов использовали 2 аллель-специфичных олигонуклеотидных зонда, модифицированных двумя различными флуорофорами, а также универсальный зонд, модифицированный гасителем флуоресценции.

Для постановки ПЦР использовали смесь, в которой из расчета на 1 образец (5 мкл) ДНК содержалось 0,1 мкл зондов FAM и HEX, 0,3 мкл зонда BHQ1, 0,1 мкл прямого праймера, 0,6 мкл обратного праймера, 0,24 мкл 25мМ дезоксинуклеозидтрифосфата (dNTP) и 10 мкл раствора полимеразы (0,5 мкл TAQ полимеразы и 9,5 мкл ПЦР-буфера). До общего объема в 30 мкл готовой ПЦР-смеси добавляли деионизированную воду. Нуклеотидные последовательности праймеров и зондов, использованных в ходе реакции, были следующими:

IGF1_for *5`-gAT gCT gTC CTC TgA TTA ACT TTC TAC C-3`*;
IGF1_rev *5`-CgC TgT CTT CCA TTC TAg TTT ACC C-3`*;
IGF1_FAM *5`-ATA TTC gTA Tag gAT ggg C-3`*-(*FAM*);
IGF1_HEX *5`-ATA TTC gTg Tag gAT ggg C-3`*-(*HEX*).
IGF1_BHQ *(BHQ1)-5`-gAg CAA TTT TAT ATT CCA gAg C-3`-(P)*

Генотип животных по локусу *IGF1* определяли путем анализа кривых плавления (рис. 1).

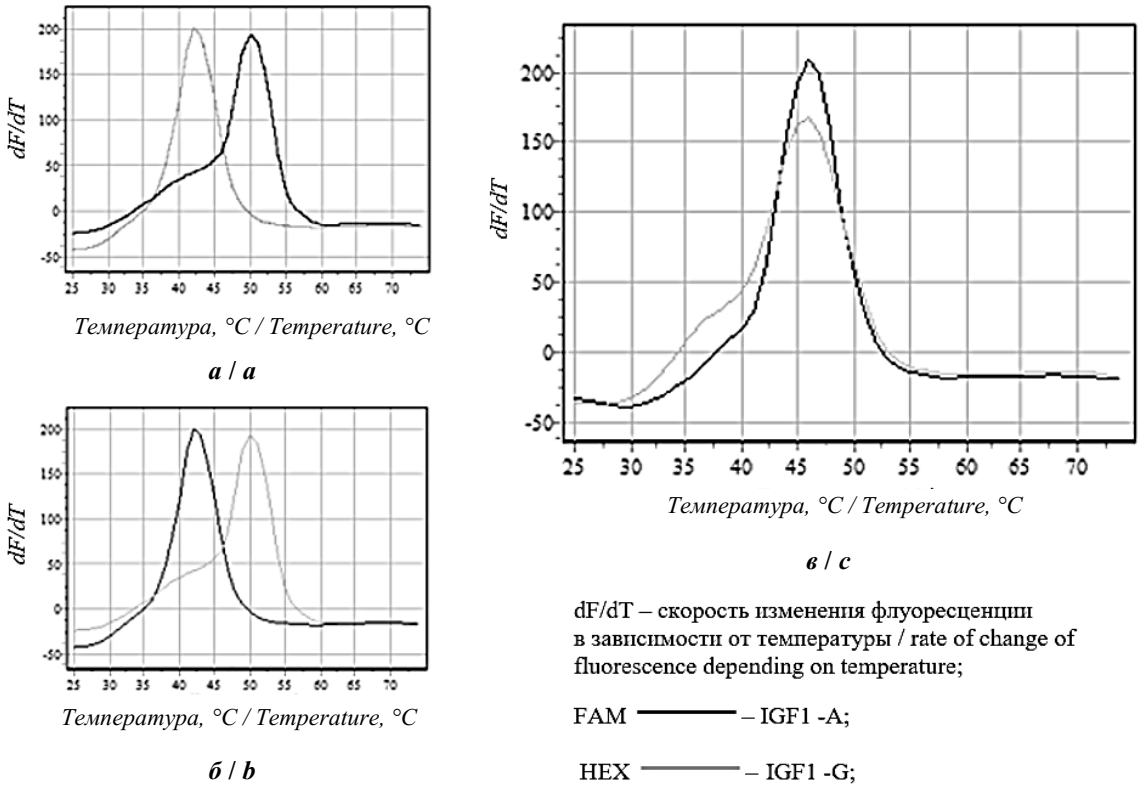


Рис. 1. **Кривые плавления и регистрация флуорофорных сигналов гена *IGF1*: а) по каналу FAM (генотип *AA*); б) по каналу HEX (генотип *GG*); в) одновременно по каналам FAM и HEX (генотип *AG*)** /
Fig. 1. **Melting curves and registration of fluorophore signals of the *IGF1* gene: a) in the FAM channel (*AA* genotype); b) in the HEX channel (*GG* genotype); c) simultaneously in the FAM and HEX channels (*AG* genotype)**

Частоту встречаемости генотипов *IGF1* вычисляли по формуле:

$$\text{P} = \frac{m}{N}, \quad (1)$$

где *P* – частота встречаемости определенного генотипа в группе; *m* – количество носителей данного генотипа, *N* – общее число особей в группе.

Частоту встречаемости аллелей гена *IGF1* в группах животных рассчитывали по формуле:

$$p = \frac{2n_{AA} + n_{AG}}{2N} \text{ и } q = \frac{2n_{GG} + n_{AG}}{2N}, \quad (2)$$

где *p* – частота встречаемости аллеля *A*, *q* – частота встречаемости аллеля *G*; n_{AA}, n_{AG}, n_{GG} – число носителей генотипов *AA, AG* и *GG* соответственно, *N* – общее число животных в группе.

Соответствие фактического распределения аллелей гена *IGF1* в группах подопытных животных теоретически возможному при соблюдении закона Харди-Вайнберга определяли с помощь уравнения Харди-Вайнберга:

$$p^2 + 2pq + q^2 = 1, \quad (3)$$

где *p* и *q* – частоты аллелей *A* и *G* соответственно.

Отношение шансов (ОШ) обнаружения носителей того или иного аллеля гена *IGF1* в той или иной группе животных оценивали с использованием модели «случай-контроль» по формуле:

$$\text{ОШ} = \frac{A \times D}{B \times C}, \quad (4)$$

где *A, B, C, D* – левое верхнее, правое верхнее, левое нижнее и правое нижнее поля таблицы соответственно.

Доверительный интервал (ДИ) для ОШ вычисляли следующим образом:

$$\text{ДИ} = \text{e}^{\ln(\text{ОШ}) \mp 1{,}96\sqrt{\frac{1}{\text{A}} + \frac{1}{\text{B}} + \frac{1}{\text{C}} + \frac{1}{\text{D}}}}. \quad (5)$$

При статистической обработке полученных результатов использовалось ПО MS Excel 2019 и среда разработки RStudio (версия языка R 4.5.1). Группы животных, сформированные согласно значению концентрации кетоновых тел в крови, проверяли на соответствие нормальному распределению с помощью статистического теста Шапиро-Уилка и построением гистограммы распределения вариант в каждой выборке.

Поскольку бóльшая часть выборок не соответствовала нормальному типу распределения, в дальнейшей статистической обработке

применяли непараметрические методы. Для сравнения выборок вычисляли их медианы с 95%-ми доверительными интервалами: M (ДИ1–ДИ2). При невозможности вычисления 95%-го доверительного интервала для медианы указывалось только ее значение. Статистическую значимость разности между медианными показателями групп проверяли тестом Манна-Уитни-Уилкоксона, принимая альтернативную гипотезу о существовании значимого различия между медианами при достижении порога статистической значимости P<0,05.

Степень изменчивости изучаемых признаков определяли путем вычисления коэффициента вариации (*Cv*) по формуле:

$$Cv = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100, \qquad (6)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение выборки; $\bar{x}$ – среднее арифметическое выборки.

Гипотезу о независимости распределения аллельных вариантов гена *IGF1* среди животных подопытных групп осуществляли методом «хи-квадрат» (χ^2), при этом альтернативную гипотезу о наличии разницы между наблюдаемым и ожидаемым частотным распределением аллелей принимали при $P<0,05$.

Для оценки степени связи между непрерывными величинами признаков оценивали путем вычисления коэффициента ранговой корреляции Спирмена (r_{ho}) в среде разработки RStudio (версия языка R 4.3.3), принимая альтернативную гипотезу о наличии связи при P<0,05.

Результаты и их обсуждение. Генотипирование подопытных коров из ООО «Минское» и АО «Племзавод «Караваево» (Костромская область) показало наличие полиморфизма по локусу *rs109763947* гена *IGF1* (рис. 2).

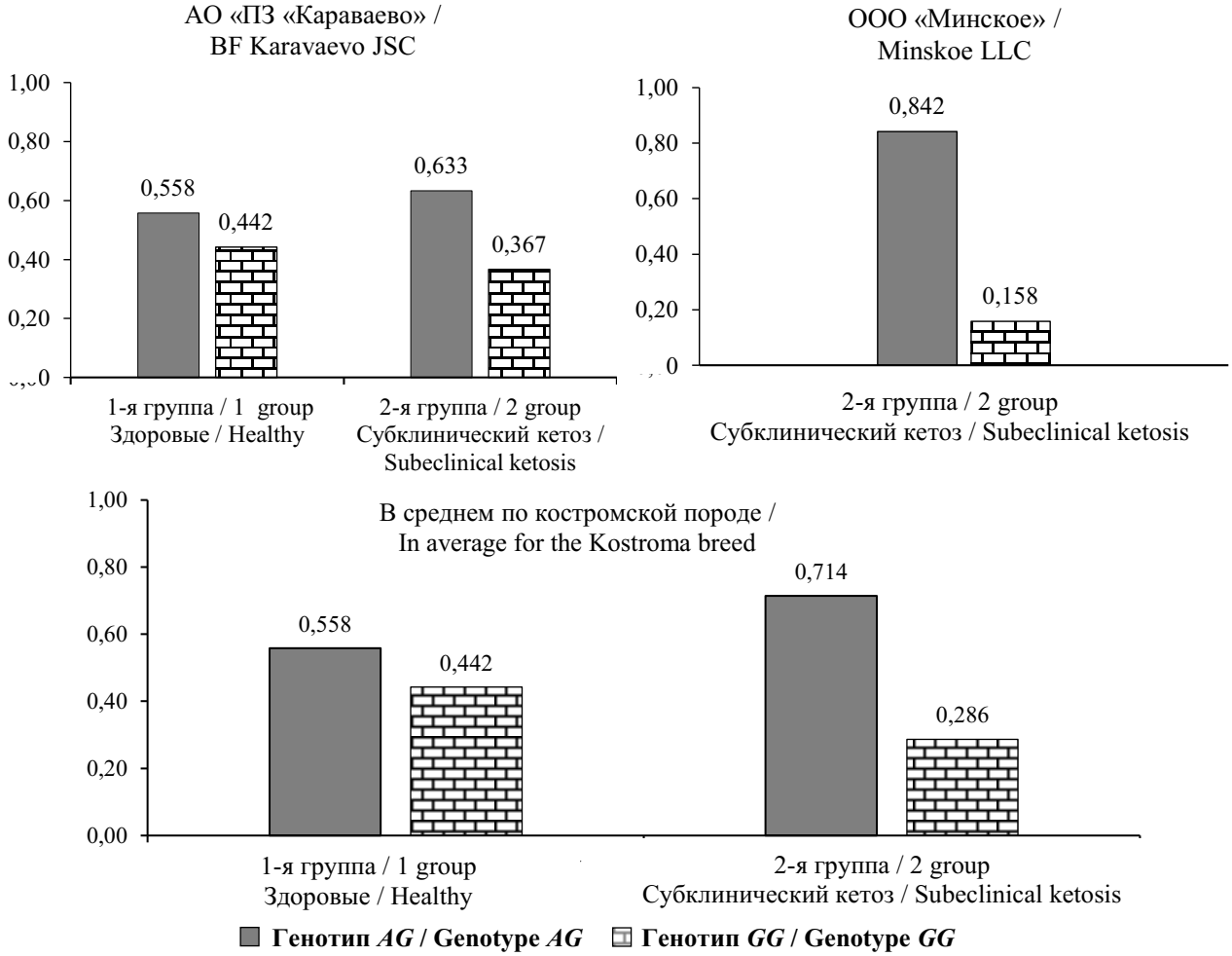


Рис. 2. **Частота генотипов *IGF1* у коров костромской породы в разрезе хозяйств и опытных групп /**
Fig. 2. **Frequency of *IGF1* genotypes in Kostroma breed cows by farms and experimental groups**

Анализ частот встречаемости генотипов *IGF1* среди подопытных животных выявил статистически значимые различия в распределении генотипов между 1-й и 2-й группой как в стаде АО «Племзавод «Караваево», так и у коров ООО «Минское» ($\chi^2 = 288,4$ и $\chi^2 = 54,9$

соответственно, P<0,001). При этом в обоих хозяйствах наблюдался статистически значимый избыток гетерозигот при $\chi^2 = 17,8$ (P<0,001) – в АО «Племзавод «Караваево» и при $\chi^2 = 10,05$ (P<0,01) – в ООО «Минское». Избыток гетерозигот по гену *IGF1* в массиве подопытных коров вызван, по всей видимости, полным исключением особей с генотипом *AA* из популяции, что может говорить о неблагоприятном влиянии этого генотипа на выживаемость его носителей в данных условиях, либо о селекционных преимуществах носителей альтернативных ему генотипов.

Наибольшей частотой характеризовался генотип *AG* как среди здоровых, так и среди коров с субклиническим кетозом, что согласуется с результатами большого количества исследований, однако ни в одном из них не зафиксировано полное отсутствие носителей генотипа *AA* (см. табл. 1).

В силу отсутствия генотипа *AA* в исследуемой выборке имело смысл проанализировать частоту аллельных вариантов гена инсулиноподобного фактора роста 1 (рис. 3).

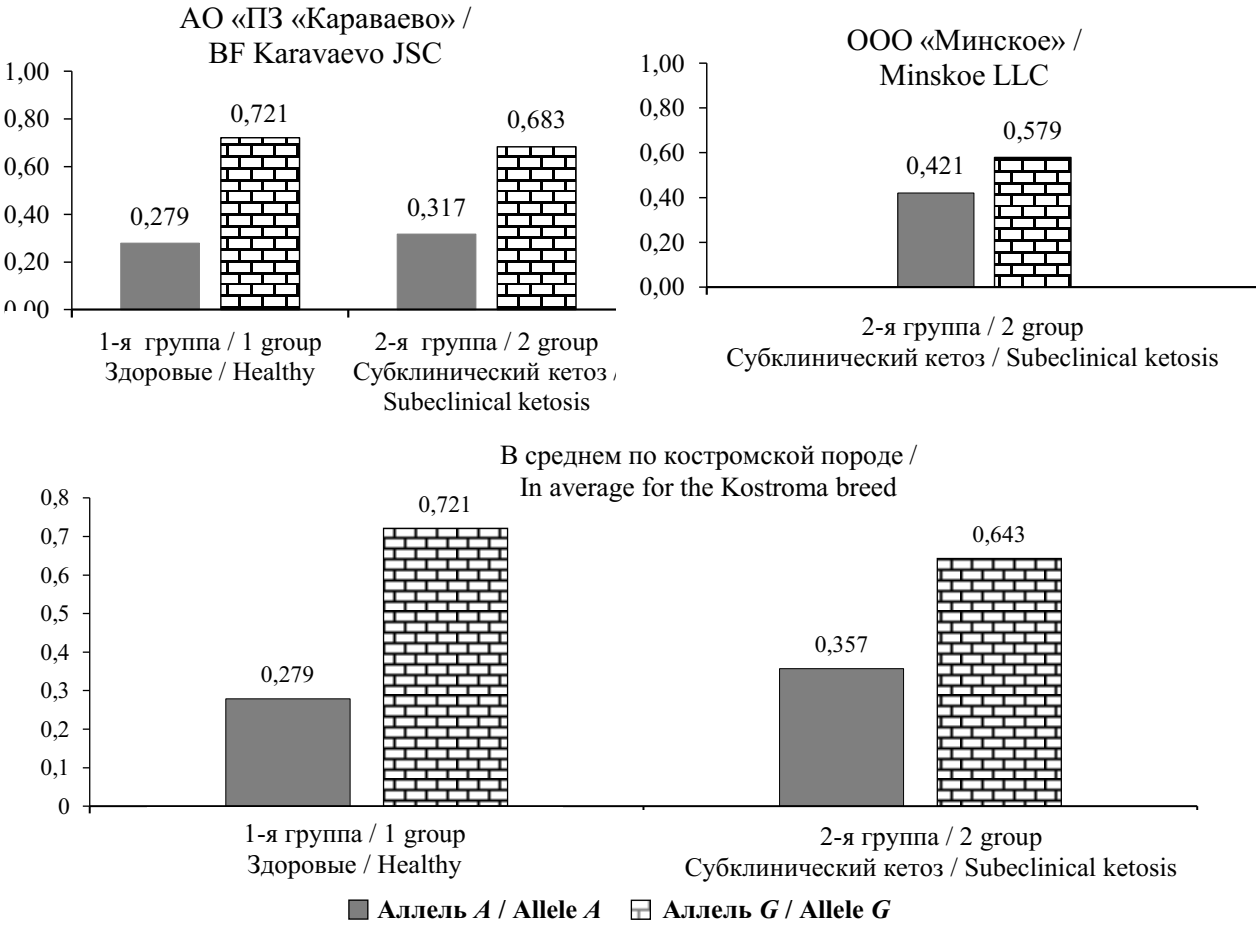


Рис. 3. **Частота аллелей гена *IGF1* у коров костромской породы в разрезе хозяйств и опытных групп /**
Fig. 3. **Allele frequency of *IGF1* gene in Kostroma breed cows by farms and experimental groups**

Распределение частот аллелей гена *IGF1* как у коров АО «Племзавод «Караваево», так и ООО «Минское» существенно смещено в сторону аллеля *G*. По данным различных исследований, преобладание аллеля *G* также наблюдали у мясного скота пород шароле, герефорд, бифмастер, аулиекольской и казахской белоголовой [10, 11, 12, 17], а также у китайских голштинов и турецкого автохтонного скота [14, 16]. Однако у коров большинства молочных пород, в отличие от полученных нами результатов, наибольшей частотой отличался аллель *A* [13, 15].

Примечательно, что у коров с субклинической формой кетоза частота аллеля *G* больше, а аллеля *A* – меньше, по сравнению со здоровыми животными. Следует отметить, что частотное распределение аллелей у здоровых и больных животных значимо различается как в АО «Племзавод «Караваево», так и в целом по выборке коров костромской породы ($\chi^2 = 11,97$ и $\chi^2 = 153,1$ соответственно, P<0,001).

Сведения о частоте аллелей гена *IGF1* у подопытных коров были дополнительно проанализированы нами с использованием модели «случай-контроль» (табл. 2).

Таблица 2 – **Модель «случай-контроль» по количеству носителей аллельных вариантов гена *IGF1* в подопытных группах /**
Table 2 – **The «event-control» model according to the number of carriers of *IGF1* gene allelic variants in experimental groups**

Аллель IGF1 / IGF1 allele	*Группа / Group*		*Всего / Total*
	1	2	
АО «ПЗ «Караваево» / BF Karavaevo JSC			
A	21,48	9,51	31,03
G	55,52	20,49	75,97
Всего / Total	77,00	30,00	107,00
ОШ / OR	0,387	0,464	0,834 (0,522–1,330)
ОШ2 / OR2	-	-	1,199 (0,751–1,914)
Итого по костромской породе / Total for the Kostroma breed			
A	21,48	17,51	38,99
G	55,52	31,49	87,01
Всего / Total	77,00	49,00	126,00
ОШ / OR	0,387	0,556	0,696 (0,470–1,030)
ОШ2 / OR2	-	-	1,437 (0,971–2,126)

Примечания: для отношения шансов (ОШ) появления носителей аллеля *A* оказаться в группе здоровых животных к появлению носителей аллеля *G* – в группе больных, указан доверительный интервал (ДИ-…ДИ+). Аналогичным образом указан доверительный интервал для отношения шансов при наступлении альтернативного события (ОШ2) /

Notes: for the odds ratio (OR) of *A* allele carriers to enter in the group of healthy animals to the occurrence of *G* allele carriers in the subclinical ketosis group, a confidence interval (CI-–CI+) is indicated. Similarly, the confidence interval for the odds ratio at the occurrence of alternative event (OR2) is indicated.

При изучении распределения аллелей *IGF1* подопытных коров по модели «случай-контроль» (табл. 2) оказалось, что шанс носительниц аллеля *A* попасть в группу здоровых животных составляет 0,834:1 при доверительном интервале 0,522–1,330, а шанс наступления альтернативного события – 1,199:1 при ДИ 0,751–1,914, что говорит об отсутствии статистической значимости (P>0,05). Рассчитать отношение шансов для коров из ООО «Минское» оказалось невозможным из-за полного отсутствия здоровых животных в выборке. В то же время, среди коров объединенной выборки из обоих хозяйств шанс носительниц аллеля *A* попасть в группу здоровых животных составляет 0,696:1 при ДИ 0,470–1,030, а шанс наступления альтернативного события – попадания носительницы аллеля *G* в эту же группу – 1,437:1 при ДИ 0,971–2,126, что также говорит об отсутствии статистической значимости. Таким образом, при анализе объединенной выборки проявилась тенденция к обнаружению здоровых коров с аллелем *G* в 2,06 раза чаще, чем с аллелем *A*.

Вместе с тем, содержание кетоновых тел у коров костромской породы разных генотипов гена *IGF1* значительно различалось (табл. 3).

Разница по уровню кетоновых тел между 1-й и 2-й группами оказалась статистически значимой как в стаде АО «Племзавод «Караваево», так и в целом по выборке. Так, разница между медианными показателями больных и здоровых гетерозиготных коров в стаде АО «Племзавод «Караваево» достигала 0,35 ммоль/л (P<0,001), а между гомозиготными коровами (*GG*) того же хозяйства – 0,67 ммоль/л (P<0,001). При этом в объединенной выборке из обеих хозяйств концентрация кетоновых тел в крови гетерозигот с субклиническим кетозом была значимо выше (на 0,45 ммоль/л) по сравнению с таковой у здоровых гетерозигот (P<0,001), у больных гомозигот *GG* эта разница была еще больше – на 0,60 ммоль/л по сравнению со здоровыми (P<0,001).

Таблица 3 – **Содержание кетоновых тел у коров костромской породы разных генотипов гена *IGF1* /**
Table 3 – **Ketone bodies in Kostroma breed cows of different *IGF1* genotypes**

Генотип / Genotype	*Концентрация кетоновых тел в крови, ммоль/л / Ketone bodies concentration in blood, mmol/l*									
	АО «ПЗ «Караваево» / BF Karavaevo JSC				*ООО «Минское» / Minskoe LLC*		*Медиана по породе / Median for Kostroma breed*			
	1-я группа / group 1		*2-я группа / group 2*		*2-я группа / group 2*		*1-я группа / group 1*		*2-я группа / group 2*	
	n	*показатель / indicator*	*n*	*показатель / indicator*	*n*	*показатель / indicator*	*n*	*показатель / indicator*	*n*	*показатель / indicator*
AA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AG	29	1,10 (1,10–1,15)^{2**}	13	1,45 (1,30–1,65)^{1***}	14	1,63 (1,50–1,75)	29	1,10 (1,10–1,15)^{2**}	27	1,55 (1.45–1,65)^{1***}
GG	24	1,05 (1,00–1,10)^{1***}	9	1,72 (1,50–3,65)	1	1,53	24	1,05 (1,00–1,10)	10	1,65 (1,50–1,90)^{1***}

Примечания: указана статистическая значимость разности показателей: 1 – между здоровыми и больными животными, 2 – между генотипами *AG* и *GG*, ** P<0,01, *** P<0,001 /

Notes the statistical significance of the difference in indicators is shown: 1 – between healthy and sick animals, 2 – between the *AG* and *GG* genotypes; ** P<0.01, *** P<0.001.

Анализ содержания кетоновых тел в крови коров разных генотипов *IGF1* в пределах одной группы показал, что среди здоровых животных с генотипом *AG* уровень кетонов достоверно выше по сравнению со здоровыми коровами генотипа *GG* на 0,05 ммоль/л (P<0,01). В группе коров с субклиническим кетозом разница между медианными показателями концентрации кетоновых тел в крови гетеро- и гомозиготных коров составила 0,27 ммоль/л, но не преодолела порог статистической значимости (P = 0,05003), тогда как в ООО «Минское» концентрация кетонов в крови гетерозиготных коров, напротив, была выше, чем у гомозиготных (на 0,10 ммоль/л). В объединенной выборке из обоих хозяйств среди животных 2-й группы тенденцию к большей концентрации кетонов проявляли гомозиготы *GG*, превосходя своих гетерозиготных сверстниц на 0,10 ммоль/л.

Примечательно, что наибольшим коэффициентом вариации среди коров АО «Племзавод «Караваево» отличаются животные с субклиническим кетозом, причем наибольшим значением *Cv* характеризуются особи с генотипом *GG* (64,4 %), тогда как гетерозиготы этой же группы обладают заметно меньшей вариабельностью (*Cv* = 43,05 %). У здоровых коров данного хозяйства изменчивость уровня кетоновых тел была существенно меньше – 5,60 и 5,96 % для соответствующих генотипов. У коров ООО «Минское», среди которых отмечались только животные с субклиническим кетозом, наибольшей вариабельностью по уровню кетоновых тел отличались гетерозиготы (*Cv* = 23,7 %), тогда как изменчивость данного показателя у носительниц генотипа *GG* была меньше – 11,2 %. В объединенной выборке из двух хозяйств наибольшей изменчивостью выделились животные 2-й группы – носительницы генотипов *GG* (*Cv* = 63,9 %) и *AG* (*Cv* = 32,3 %), здоровые коровы данных генотипов отличались меньшими значениями коэффициента вариации – 5,55 и 5,96 % соответственно.

Возможное влияние полиморфизма гена *IGF1* на молочную продуктивность коров было изучено на выборке из АО «Племзавод «Караваево», поскольку только в этом хозяйстве обнаружены носители разных генотипов и с различным уровнем кетоновых тел в количестве, достаточном для статистического анализа (табл. 4).

При анализе данных, представленных в таблице 4, обнаружена статистически значимая разница между медианными удоями здоровых коров с гетерозиготным и гомозиготным генотипами по локусу *IGF1* (P<0,05), причем удой последних был больше на 979,7 кг (11,1 %). При анализе объединенной выборки (без учета их статуса по содержанию кетоновых тел в крови) наибольшим удоем – на 804 кг (9 %) обладали коровы с гомозиготным генотипом по сравнению с гетерозиготами (P<0,05). Разница по медианному удою между коровами разных генотипов *IGF1* в группе с субклиническим кетозом составила 468,5 кг (5,1 %) в пользу гомозиготных животных, но не достигла порога статистической значимости. По остальным показателям молочной продуктивности разница между носителями разных генотипов *IGF1* также не была достоверной. В то же время в обеих группах прослеживалась тенденция к повышенным параметрам удоя, содержания

жира и белка в молоке у гомозиготных коров (*GG*), что согласуется с исследованиями Л. Р. Загидуллина с соавторами (2021) и Ахмед А. Салех и др. (Ahmed A. Saleh et al., 2024) [8, 20]. По удою эта разница в группе здоровых животных составила 9,8 %, по массовой доле жира (МДЖ) и белка (МДБ) различия были незначительны (0,03 и 0,01 % соответственно). Среди больных коров разница между генотипами по удою была меньше (5,1 %) и сопровождалась незначительной разницей по массовой доле жира (0,03 %) и белка (0,11 %).

Таблица 4 – **Показатели молочной продуктивности коров с различными генотипами *IGF1* из стада АО «Племзавод «Караваево» /**
Table 4 – **Dairy productivity parameters of cows with different *IGF1* genotypes from the herd of the BF Karavaevo JSC**

Группа / Group	*Показатель / Parameter*	*Генотип / Genotype*			*Медиана / Median*
		AA	*AG*	*GG*	
1	n	-	29	24	53
	Удой, кг / Milk yield, kg	-	7849,0* (7214,5–8427,5)	8828,7 (8234,0–9341,0)	8325,0 (7888,5–8805,0)
	МДЖ, % / MFF, %	-	4,14 (4,06–4,22)	4,17 (4,05–4,27)	4,15 (4,08–4,21)
	МДБ, % / MFP, %	-	3,44 (3,39–3,50)	3,45 (3,37–3,52)	3,44 (3,41–3,48)
2	n	-	13	9	22
	Удой, кг / Milk yield, kg	-	8700,0 (7780,5–9810,0)	9168,5 (7653,5–9976,5)	8827,0 (8041,5–9584,5)
	МДЖ, % / MFF, %	-	4,19 (4,07… 4,31)	4,22 (4,02–4,41)	4,20 (4,11–4,28)
	МДБ, % / MFP, %	-	3,40 (3,35–3,47)	3,51 (3,39–3,77)	3,43 (3,38–3,51)
Медиана / Median	n	-	42	33	75
	Удой, кг / Milk yield, kg	-	8108,5* (7574,0–8594,0)	8912,5 (8413,0–9363,0)	8489,8 (8119,0–8864,5)
	МДЖ, % / MFF, %	-	4,15 (4,09–4,22)	4,18 (4,09–4,27)	4,16 (4,11–4,21)
	МДБ, % / MFP, %	-	3,43 (3,39–3,47)	3,46 (3,40–3,52)	3,44 (3,40–3,48)

Примечания: указана статистическая значимость разности показателей между генотипами *AG* и *GG*; МДЖ – массовая доля жира; МДБ – массовая доля белка; * P<0,05 /

Notes: the statistical significance of the difference in parameters is indicated between the *AG* and *GG* genotypes; MFF is the mass fraction of fat; MFP is the mass fraction of protein; * P<0.05

Кроме того, прослеживалась тенденция к повышенному удою и содержанию жира в молоке коров с субклиническим кетозом по сравнению со здоровыми животными: среди носительниц генотипа *AG* она составила 851 кг и 0,04 %, среди гомозигот *GG* – 339,8 кг и 0,05 % соответственно. Разница по МДЖ и МДБ между больными и здоровыми коровами с генотипом *GG* составила 0,06 %, но не достигла статистической значимости, у здоровых гетерозигот, напротив, МДБ была на 0,04 % больше, чем у больных.

В дополнение к сравнению групп провели корреляционный анализ между уровнем кетоновых тел в крови и показателями молочной продуктивности подопытных коров. Результаты расчетов показали, что корреляция между удоем и уровнем кетонов была слабой и недостоверной – в целом по выборке животных из АО «Племзавод «Караваево» коэффициент ранговой корреляции удоя и уровня кетоновых тел составил 0,13, а в разрезе генотипов *AG* и *GG* – 0,227 и 0,233 соответственно (P>0,05).

В отношении концентрации кетоновых тел и МДЖ данная тенденция проявлялась еще слабее – r_{ho} по всем коровам выборки АО «Племзавод «Караваево» составил 0,106, отдельно по генотипам *AG* и *GG* – 0,022 и 0,205 соответственно (P>0,05).

Наиболее высокий коэффициент ранговой корреляции – 0,349 – отмечен у гомозиготных коров (*GG*) между уровнем кетоновых тел в крови и содержанием молочного белка (P<0,05). Более слабая и недостоверная корре-

ляция между этими показателями установлена у гетерозиготных животных и по всей выборке (0,007 и 0,168 соответственно).

Выводы. По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Исследуемая популяция коров костромской породы полиморфна по локусу *IGF1* (*rs109763947*), однако носители гомозиготного генотипа *AA* полностью отсутствуют. Это сопровождается статистически значимым смещением генного равновесия в сторону избытка гетерозигот в популяции (P<0,001), что может быть вызвано их селекционным преимуществом перед гомозиготами.

2. Соотношение частот аллелей *A* и *G* гена *IGF1* в исследуемой популяции смещено в сторону аллельного варианта *G*, при этом у животных с субклинической формой кетоза частота аллеля *A* значимо выше, чем у здоровых животных (P<0,001). Расчет модели «случай-контроль» показал, что носительницы аллеля *A* имеют тенденцию в 2,06 раза реже обнаруживаться среди здоровых животных, чем носительницы аллеля *G*, однако отношение шансов для этих событий не достигло порога статистической значимости.

3. Статистически значимая разница по концентрации кетоновых тел в крови между носительницами разных генотипов гена *IGF1* выявлена только в группе здоровых животных – 0,05 ммоль/л в пользу гетерозигот (P<0,001), а среди коров с субклиническим кетозом отмечалась противоположная тенденция – гомозиготы *GG* превосходили гетерозигот на 0,27 ммоль/л. При этом в группе больных коров наблюдалась более выраженная дисперсия по содержанию кетонов в крови, чем у здоровых животных, что может указывать на влияние иных генетических факторов, помимо полиморфизма гена *IGF1*, на уровень кетоновых тел в крови животных.

4. Установлено, что коровы с генотипом *GG* гена *IGF1* достоверно превосходили (P<0,05) гетерозиготных сверстниц по удою в группе здоровых животных (на 979 кг, или 11,1 %) и в целом по выборке из АО «Племзавод Караваево» (804 кг, или 9 %). Наибольшее содержание жира и белка в молоке также отмечали у носителей генотипа *GG*. Расчет коэффициента ранговой корреляции показал статистически значимую положительную связь (r_{ho} = 0,349) между массовой долей белка в молоке и содержанием кетонов в крови гомозиготных коров (*GG*, P<0,05), однако по другим параметрам достоверной корреляции не обнаружено.

Таким образом, было установлено определенное влияние полиморфизма *rs109763947* гена *IGF1* на содержание кетоновых тел в крови коров, однако для осуществления селекции животных, устойчивых к заболеванию кетозом, данный локус необходимо рассматривать в комплексе с другими ДНК-маркерами.

Список литературы

1. Partridge L. N., Alic N., Bjedov I., Piper M. D. W. Ageing in drosophila: the role of the insulin/Igf and TOR signalling network. Experimental Gerontology. 2011;46(5):376–381. DOI: https://doi.org/10.1016/j.exger.2010.09.003

2. Белая Е. В., Михайлова М. Е. SnaBI-полиморфизм гена инсулиноподобного фактора роста (bIGF-I) у крупного рогатого скота. Молекулярная и прикладная генетика. 2009;9:153–159. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38553705 EDN: LTPZMA

3. Nikolić-Judith A., Šamanch H., Kovačević M. Serum concentrations of insulin-like growth factors and thyroid hormones in healthy and ketotic dairy cows during the puerperium. Acta Veterinaria. 2001;51(2):73–88. DOI: https://doi.org/10.2298/AVB1106489P

4. Kim J. W. Modulation of the somatotropic axis in periparturient dairy cows. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences. 2014;27(1):147–154. DOI: https://doi.org/10.5713/ajas.2013.13139

5. Petruh I., Simonov M., Vlizlo V., Ostapiv D. The role of insulin-like growth factor and leptin in the pathogenesis of internal non-contagious pathology of dairy cows. Ukrainian journal of veterinary and agricultural sciences. 2018;1(2):19–22. DOI: https://doi.org/10.32718/ujvas1-2.05

6. Gross J., van Dorland H. A., Schwarz F. J., Bruckmaier R. M. Endocrine changes and liver mRNA abundance of somatotropic axis and insulin system constituents during negative energy balance at different stages of lactation in dairy cows. Journal of Dairy Science. 2011;94(7):3484–3494. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2011-4251

7. Михайлова М. Е., Белая Е. В., Волчок Н. М. Влияние полиморфных вариантов генов соматотропинового каскада (bPit-1, bPrl, bGH, bGHR, bIGF-1) на признаки молочной продуктивности крупного рогатого скота чёрно-пёстрой породы белорусского разведения. Научный вестник Национального университета биоресурсов и природопользования Украины. 2011;160(2):273–280.

8. Загидуллин Л. Р., Гилемханов И. Ю., Ахметов Т. М., Шайдуллин Р. Р., Тюлькин С. В. Молочная продуктивность и качество молока коров с разными генотипами по гену IGF1. Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2021;(4(67)):135–139.
Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47405598 EDN: WTRTZZ

9. Ge W., Davis M. E., Hines H. C., Irvin K. M., Simmen R. C. Association of a genetic marker with blood serum insulin-like growth factor-I concentration and growth traits in Angus cattle. Journal of Animal Science. 2001;79(7):1757–1762. DOI: https://doi.org/10.2527/2001.7971757x

10. Бейшова И. С., Траисов Б. Б., Косилов В. И. Характеристика генетической структуры селекционного поголовья аулиекольской и казахской белоголовой пород по полиморфным генам соматотропинового каскада. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017;(6(68)):261–265.
Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32277897 EDN: YLSHIE

11. Гаджиев З. К., Суржикова Е. С., Евлагина Д. Д., Суров А. И., Шумаенко С. Н. ДНК-тестирование аллельного полиморфизма генов IGF-1, GDF5, GH, \ у молодняка мясного скота. Аграрный научный журнал. 2023;(9):82–87. DOI: https://doi.org/10.28983/asj.y2023i9pp82-87 EDN: DEXXXF

12. Дубовскова М. П. Генотипирование скота герефордской породы по генам GHR, IGF-1 и GDF5. Животноводство и кормопроизводство. 2022;105(3):47–55. DOI: https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-3-47 EDN: MZEQQC

13. Arslan K., Taheri S., Şener E. F., Akyüz B., Akçay A., Özkul Y., İşcan K. M. Investigation of the promoter polymorphisms of the growth hormone (GH1), growth hormone receptor (GHR), insulin-like growth factor (IGF-I), and prolactin (PRL) genes and the correlation between gene expression and milk yields in Holstein cattle raised in Central Anatolia. Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences. 2016;40(5):609–615.
DOI: https://doi.org/10.3906/vet-1510-66

14. Li C., Sun D., Zhang S., Yang S., Alim M. A., Zhang Q. et al. Genetic effects of FASN, PPARGC1A, ABCG2 and IGF1 revealing the association with milk fatty acids in a Chinese Holstein cattle population based on a post genome- wide association study. BMC Genetics. 2016;17:110. DOI: https://doi.org/10.1186/s12863-016-0418-x

15. Ulyanov V. A., Kubekova B. Z., Beishova I. S., Belaya A. V., Papusha N. V. Preferred and undesirable genotypes of bGH and bIGF-1 genes for the milk yield and quality of black-and-white breed. Veterinary World. 2021;14(5):1202–1209. DOI: https://doi.org/10.14202/vetworld.2021.1202-1209

16. Çobanoğlu Ö., Ardiçli S. Genetic variation at the OLR1, ANXA9, MYF5, LTF, IGF1, LGB, CSN3, PIT1, MBL1, CACNA2D1, and ABCG2 loci in Turkish Grey Steppe, Anatolian Black, and East Anatolian Red cattle. Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences. 2022;46(3):494–504.
DOI: https://doi.org/10.55730/1300-0128.4220

17. Beishova I. S., Ulyanov V. A., Shaikamal G., Papusha N. V., Belaya E. V. Features of holstein cattle bred in kazakhstan by the polymorphic genes of the somatotropin cascade. Advances in Animal and Veterinary Sciences. 2019;7(s1):60–65. DOI: https://doi.org/10.17582/journal.aavs/2019/7.s1.60.65

18. De la Rosa Reyna X. F., Montoya H. M., Castrellón V. V., Rincón A. M. S., Bracamonte M. P., Vera W. A. Polymorphisms in the IGF1 gene and their effect on growth traits in Mexican beef cattle. Genetics and Molecular Research. 2010;9(2):875–883. DOI: https://doi.org/10.4238/vol9-2gmr745

19. Gerasimov N. P., Dzhulamanov K. M., Lebedev S. V., Kolpakov V. I. Effect of IGF-1 C472T, GH C2141G, and GHR T914A polymorphisms on growth performance and feed efficiency in young Kazakh white-headed cattle. Veterinary World. 2023;16(8):1584–1592. DOI: https://doi.org/10.14202/vetworld.2023.1584-1592

20. Saleh A. A., Hassan T. G. M., EL-Hedainy D. K. A., El-Barbary A. S. A., Sharaby M. A., Hafez E. E., Rashad A. M. A. IGF-I and GH Genes polymorphism and their association with milk yields, composition and reproductive performance in Holstein–Friesian dairy cattle. BMC Veterinary Research. 2024;20:341.
DOI: https://doi.org/10.1186/s12917-024-04188-4

21. Lirón J. P., Prando J., Fernández M. E., Ripoli M. V., Rogberg-Muñoz A., Goszczynski D. E. et al. Association between GNRHR, LHR and IGF1 polymorphisms and timing of puberty in male Angus cattle. BMC Genetics. 2012;13:26. DOI: https://doi.org/10.1186/1471-2156-13-26

22. Soares R. A. N., Vargas G., Duffield T., Schenkel F., Squires E. J. Genome-wide association study and functional analyses for clinical and subclinical ketosis in Holstein cattle. Journal of Dairy Science. 2021;104(9):10076-10089. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2020-20101

23. Wu X., Huang K., Wei C., Chen F., Pan C. Regulation of cellular glutathione peroxidase by different forms and concentrations of selenium in primary cultured bovine hepatocytes. The Journal of Nutritional Biochemistry. 2010;21(2):153–161. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2008.12.006

References

1. Partridge L. N., Alic N., Bjedov I., Piper M. D. W. Ageing in drosophila: the role of the insulin/Igf and TOR signalling network. Experimental Gerontology. 2011;46(5):376–381.
DOI: https://doi.org/10.1016/j.exger.2010.09.003

2. Belaya E. V., Mikhaylova M. E. SnaBI-polymorphism of insulin-like growth factor gene (*bIGF-I*) in cattle. *Molekulyarnaya i prikladnaya genetika*. 2009;9:153–159. (In Russ.).
URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38553705

3. Nikolić-Judith A., Šamanch H., Kovačević M. Serum concentrations of insulin-like growth factors and thyroid hormones in healthy and ketotic dairy cows during the puerperium. Acta Veterinaria. 2001;51(2):73–88. DOI: https://doi.org/10.2298/AVB1106489P

4. Kim J. W. Modulation of the somatotropic axis in periparturient dairy cows. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences. 2014;27(1):147–154. DOI: https://doi.org/10.5713/ajas.2013.13139

5. Petruh I., Simonov M., Vlizlo V., Ostapiv D. The role of insulin-like growth factor and leptin in the pathogenesis of internal non-contagious pathology of dairy cows. Ukrainian journal of veterinary and agricultural sciences. 2018;1(2)|:19–22. DOI: https://doi.org/10.32718/ujvas1-2.05

6. Gross J., van Dorland H. A., Schwarz F. J., Bruckmaier R. M. Endocrine changes and liver mRNA abundance of somatotropic axis and insulin system constituents during negative energy balance at different stages of lactation in dairy cows. Journal of Dairy Science. 2011;94(7):3484–3494. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2011-4251

7. Mikhaylova M. E., Belaya E. V., Volchok N. M. The effect of polymorphic variants of the somatotropin cascade genes (bPit-1, bPRL, bGH, bGHR, bigF-1) on the traits of dairy productivity in Black-and-White cattle of the Belarusian breed. *Nauchny vestnik Natsionalnogo universiteta bioresursov i prirodopolzovaniya Ukraini*. 2011;160(2):273–280. (In Ukraine).

8. Zagidullin L. R., Gilemkhanov I. Yu., Akhmetov T. M., Shaydullin R. R., Tyulkin S. V. Milk productivity and milk quality of cows with different genotypes by the IGF1 gene. *Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;(4(67)):135–139. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47405598

9. Ge W., Davis M. E., Hines H. C., Irvin K. M., Simmen R. C. Association of a genetic marker with blood serum insulin-like growth factor-I concentration and growth traits in Angus cattle. Journal of Animal Science. 2001;79(7):1757–1762. DOI: https://doi.org/10.2527/2001.7971757x

10. Beyshova I. S., Traisov B. B., Kosilov V. I. Characteristics of genetic structure of the auliekolsky and kazakh white-head breeding cattle stock based on polymorphic genes of somatotropine cascade. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2017;(6(68)):261–265. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32277897

11. Gadzhiyev Z. K., Surzhikova E. S., Evlagina D. D., Surov A. I., Shumayenko S. N. DNA testing of allelic polymorphism of IGF-1, GDF 5, GH, GHR genes in young beef cattle. *Agrarny nauchny zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2023;(9):82–87. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.28983/asj.y2023i9pp82-87

12. Dubovskova M. P. Genotyping of hereford cattle for GHR, IGF-1 AND GDF5 genes. *Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo* = Animal Husbandry and Fodder Production. 2022;105(3):47–55. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.33284/2658-3135-105-3-47

13. Arslan K., Taheri S., Şener E. F., Akyüz B., Akçay A., Özkul Y., İşcan K. M. Investigation of the promoter polymorphisms of the growth hormone (GH1), growth hormone receptor (GHR), insulin-like growth factor (IGF-I), and prolactin (PRL) genes and the correlation between gene expression and milk yields in Holstein cattle raised in Central Anatolia. Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences. 2016;40(5):609–615.
DOI: https://doi.org/10.3906/vet-1510-66

14. Li C., Sun D., Zhang S., Yang S., Alim M. A., Zhang Q. et al. Genetic effects of FASN, PPARGC1A, ABCG2 and IGF1 revealing the association with milk fatty acids in a Chinese Holstein cattle population based on a post genome- wide association study. BMC Genetics. 2016;17:110. DOI: https://doi.org/10.1186/s12863-016-0418-x

15. Ulyanov V. A., Kubekova B. Z., Beishova I. S., Belaya A. V., Papusha N. V. Preferred and undesirable genotypes of bGH and bIGF-1 genes for the milk yield and quality of black-and-white breed. Veterinary World. 2021;14(5):1202–1209. DOI: https://doi.org/10.14202/vetworld.2021.1202-1209

16. Çobanoğlu Ö., Ardiçli S. Genetic variation at the OLR1, ANXA9, MYF5, LTF, IGF1, LGB, CSN3, PIT1, MBL1, CACNA2D1, and ABCG2 loci in Turkish Grey Steppe, Anatolian Black, and East Anatolian Red cattle. Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences. 2022;46(3):494–504. DOI: https://doi.org/10.55730/1300-0128.4220

17. Beishova I. S., Ulyanov V. A., Shaikamal G., Papusha N. V., Belaya E. V. Features of holstein cattle bred in kazakhstan by the polymorphic genes of the somatotropin cascade. Advances in Animal and Veterinary Sciences. 2019;7(s1):60–65. DOI: https://doi.org/10.17582/journal.aavs/2019/7.s1.60.65

18. De la Rosa Reyna X. F., Montoya H. M., Castrellón V. V., Rincón A. M. S., Bracamonte M. P., Vera W. A. Polymorphisms in the IGF1 gene and their effect on growth traits in Mexican beef cattle. Genetics and Molecular Research. 2010;9(2):875–883. DOI: https://doi.org/10.4238/vol9-2gmr745

19. Gerasimov N. P., Dzhulamanov K. M., Lebedev S. V., Kolpakov V. I. Effect of IGF-1 C472T, GH C2141G, and GHR T914A polymorphisms on growth performance and feed efficiency in young Kazakh white-headed cattle. Veterinary World. 2023;16(8):1584–1592. DOI: https://doi.org/10.14202/vetworld.2023.1584-1592

20. Saleh A. A., Hassan T. G. M., EL-Hedainy D. K. A., El-Barbary A. S. A., Sharaby M. A., Hafez E. E., Rashad A. M. A. IGF-I and GH Genes polymorphism and their association with milk yields, composition and reproductive performance in Holstein–Friesian dairy cattle. BMC Veterinary Research. 2024;20:341.
DOI: https://doi.org/10.1186/s12917-024-04188-4

21. Lirón J. P., Prando J., Fernández M. E., Ripoli M. V., Rogberg-Muñoz A., Goszczynski D. E. et al. Association between GNRHR, LHR and IGF1 polymorphisms and timing of puberty in male Angus cattle. BMC Genetics. 2012;13:26. DOI: https://doi.org/10.1186/1471-2156-13-26

22. Soares R. A. N., Vargas G., Duffield T., Schenkel F., Squires E. J. Genome-wide association study and functional analyses for clinical and subclinical ketosis in Holstein cattle. Journal of Dairy Science. 2021;104(9):10076-10089. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2020-20101

23. Wu X., Huang K., Wei C., Chen F., Pan C. Regulation of cellular glutathione peroxidase by different forms and concentrations of selenium in primary cultured bovine hepatocytes. The Journal of Nutritional Biochemistry. 2010;21(2):153–161. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2008.12.006

Вклад авторов: Чаицкая К. Д. – концепция и план исследования, подготовка рукописи; Чаицкий А. А. – концепция и план исследования, анализ данных; Щеголев П. О. – анализ данных, подготовка рукописи; Королев А. А. – концепция и план исследования; Дуркина В. А. – подготовка рукописи.

Сведения об авторах

✉ **Чаицкая Ксения Дмитриевна**, кандидат вет. наук, доцент кафедры внутренних незаразных болезней, хирургии и акушерства, ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия», ул. Учебный городок, 34, п. Караваево, Костромской район, Костромская область, Российская Федерация, 156530, e-mail: Info@kgsxa.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3282-4779**, e-mail: kseniyasabetova@mail.ru

Чаицкий Алексей Александрович, кандидат биол. наук, заведующий лабораторией генетики и ДНК-технологий, преподаватель кафедры частной зоотехнии, разведения и генетики, ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия», ул. Учебный городок, 34, п. Караваево, Костромской район, Костромская область, Российская Федерация, 156530, e-mail: Info@kgsxa.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5853-3809

Щеголев Павел Олегович, кандидат с.-х. наук, селекционер-зоотехник центра информационного обеспечения, ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия», ул. Учебный городок, 34, п. Караваево, Костромской район, Костромская область, Российская Федерация, 156530,
e-mail: Info@kgsxa.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3552-8457**

Королев Антон Александрович, кандидат с.-х. наук, заведующий центром информационного обеспечения, ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия», ул. Учебный городок, 34, п. Караваево, Костромской район, Костромская область, Российская Федерация, 156530,
e-mail: Info@kgsxa.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1561-5449**

Дуркина Виктория Алексеевна, студент, лаборант лаборатории генетики и ДНК-технологий, ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия», ул. Учебный городок, 34, п. Караваево, Костромской район, Костромская область, Российская Федерация, 156530, e-mail: Info@kgsxa.ru,
ORCID: https://orcid.org/0009-0006-8530-6202

Author contributions: Chaitskaya K. D. – research concept and plan, manuscript preparation; Chaitsky A. A. – research concept and plan, data analysis; Schegolev P. O. – data analysis, manuscript preparation; Korolev A. A. – research concept and plan; Durkina V. A. – manuscript preparation.

Information about the authors

✉ **Kseniya D. Chaitskaya**, PhD in Veterinary Science, associate professor at the Department of Internal Non-Communicable Diseases, Surgery and Obstetrics, Kostroma State Agricultural Academy, Uchebny Gorodok, 34, Karavaevo, Kostroma region, Russian Federation, 156530, e-mail: Info@kgsxa.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3282-4779, e-mail: kseniyasabetova@mail.ru

Alexey A. Chaitskiy, PhD in Biology, Head of the Laboratory of Genetics and DNA Technologies, lecturer, the Department of Private Animal Science, Breeding, and Genetics, Kostroma State Agricultural Academy, Uchebny Gorodok, 34, Karavaevo, Kostroma region, Russian Federation, 156530, e-mail: Info@kgsxa.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5853-3809

Pavel O. Schiogolev, PhD in Agricultural Science, breeder-zootechnician, the Information Support Center, Kostroma State Agricultural Academy, Uchebny Gorodok, 34, Karavaevo, Kostroma region, Russian Federation, 156530, e-mail: Info@kgsxa.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3552-8457**

Anton A. Korolev, PhD in Agricultural Science, Head of the Information Support Center, Kostroma State Agricultural Academy, Uchebny Gorodok, 34, Karavaevo, Kostroma region, Russian Federation, 156530,
e-mail: Info@kgsxa.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1561-5449**

Viktoriya A. Durkina, student, laboratory assistant, the Laboratory of Genetics and DNA Technologies, Kostroma State Agricultural Academy, Uchebny Gorodok, 34, Karavaevo, Kostroma region, Russian Federation, 156530, e-mail: Info@kgsxa.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0006-8530-6202**

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.425–434
УДК 636.082

(cc) BY

Ассоциация полиморфизма гена *MBL1* с показателями молочной продуктивности у коров холмогорской породы

© 2026. Н. А. Худякова[1] ✉, И. С. Кожевникова[1, 2], А. О. Ступина[1], И. А. Классен[1], А. С. Кашин[1]

[1]*ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, г. Архангельск, Российская Федерация,*
[2]*ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова», г. Архангельск, Российская Федерация*

Исследование проводили в Архангельской области на выборке, состоящей из 430 коров холмогорской породы. Цель – изучить ассоциации полиморфизма гена маннозосвязывающего лектина (MBL1) с показателями молочной продуктивности. Образцы ДНК анализировали методом ПЦР-ПДРФ на носительство аллельных вариантов гена MBL1 с эндонуклеазой рестрикции Hae III: TT (255 п.н.); TC (255/178/77 п.н.); CC (178/77 п.н.). Статистическую обработку проводили с использованием U-критерия Манна-Уитни (p<0,05). Генотипы в выборке распределились следующим образом: CC – 26,98 % (116 гол.), TC – 50,70 % (218 гол.), TT – 22,32 % (96 гол.). Анализ продемонстрировал значительное преимущество коров с генотипом CC по содержанию жира в молоке, составившему 3,75 % для всей популяции. Этот показатель превышал значение для генотипа TC (3,69 %) на 0,06 % и для генотипа TT (3,60 %) – на 0,15 %, что подтверждено статистически достоверными различиями. Полученные результаты обосновывают целесообразность включения анализа полиморфизма гена MBL1 в программы селекции холмогорского скота с акцентом на использование особей с генотипом CC при формировании племенного ядра. Для комплексного улучшения продуктивных качеств рекомендуется сочетать селекцию по аллелю C с отбором по показателям молочной продуктивности. Перспективным направлением дальнейших исследований представляется изучение взаимосвязи MBL1 с другими генами, влияющими на молокообразование и резистентность организма, что позволит разработать более эффективные стратегии генетического улучшения стада в условиях северных регионов России. Реализация полученных данных в селекционной практике будет способствовать оптимизации племенной работы и повышению экономической эффективности молочного скотоводства.

Ключевые слова: *массовая доля жира, массовая доля белка, удой, генотип, ПЦР-ПДРФ*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук (тема № FUUW-2024–0006).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Худякова Н. А., Кожевникова И. С., Ступина А. О., Классен И. А., Кашин А. С. Ассоциация полиморфизма гена *MBL1* с показателями молочной продуктивности у коров холмогорской породы. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):425–434. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.425-434

Поступила: 10.07.2025 Принята к публикации: 15.04.2026
Доработана после рецензирования: 10.09.2025 Опубликована онлайн: 27.04.2026

Association of *MBL1* gene polymorphism with milk productivity in Kholmogory breed cows

© 2026. Natalia A. Khudyakova[1]✉, Irina S. Kozhevnikova[1, 2], Alexandra O. Stupina[1], Inga A. Klassen[1], Andrey S. Kashin[1]

[1]*N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russian Federation,*
[2]*Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russian Federation*

The study was conducted in the Arkhangelsk region using a sample of 430 Kholmogory cows. The aim of this study was to investigate associations between polymorphisms in the mannose-binding lectin (MBL1) gene and milk productivity traits. The samples of DNA were analyzed using PCR-RFLP method with the HaeIII restriction enzyme to identify MBL1 allelic variants: TT (255 bp), TC (255, 178, and 77 bp), and CC (178 and 77 bp). Statistical analysis was performed using the Mann-Whitney U test (p<0.05). Genotype distribution in the sample was as follows: CC – 26.98 % (116 animals), TC – 50.70 % (218 animals), and TT – 22.32 % (96 animals). The analysis revealed significant superiority of CC genotype cows in milk fat content, averaging 3.75 % for the population. This value was 0.06 % higher than in TC genotype (3.69 %) and 0.15 % higher than in TT genotype (3.60 %), with statistically significant differences confirmed. These results justify incorporating MBL1

gene polymorphism analysis into Kholmogory cattle breeding programs, with particular emphasis on selecting CC genotype animals for nucleus herds. To comprehensively improve the production traits, it is recommended to combine selection for the C allele with milk productivity indicators. A promising direction for further research involves studying MBL1 interactions with other genes affecting milk synthesis and disease resistance, which would enable development of more effective genetic improvement strategies for northern Russian regions. Implementation of these findings in breeding practice will optimize herd management and enhance economic efficiency of dairy cattle farming.

Keywords: *fat mass fraction, protein mass fraction, milk yield, genotype, PCR-RFLP*

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian within the state assignment of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (theme No. FUUW-2024-0006).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors stated no conflict of interest.

For citations: Khudyakova N. A., Kozhevnikova I. S., Stupina A. O., Klassen I. A., Kashin A. S. Association of *MBL1* gene polymorphism with milk productivity in Kholmogory breed cows. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):425–434. (In Russ.) DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.425-434

Received: 10.07.2025 Accepted for publication: 15.04.2026
Revised: 10.09.2025 Published online: 27.04.2026

Молочная продуктивность крупного рогатого скота остается ключевым фактором экономической эффективности животноводства, определяя рентабельность молочных хозяйств и качество конечной продукции. В условиях глобализации рынка и повышения требований к пищевой безопасности современная селекция сталкивается с необходимостью одновременного улучшения как количественных, так и качественных показателей молочной продукции. При этом традиционные методы отбора, ориентированные преимущественно на увеличение удоев, зачастую приводят к непреднамеренному снижению адаптивного потенциала животных и их устойчивости к заболеваниям. В этом контексте особое значение приобретает изучение молекулярно-генетических механизмов, лежащих в основе формирования хозяйственно полезных признаков, с последующим внедрением полученных знаний в практику селекционной работы [1, 2, 3].

Среди перспективных генетических маркеров особый интерес представляет ген маннозосвязывающего лектина (*MBL1*), играющий важную роль в регуляции как иммунных реакций, так и метаболических процессов, связанных с молокообразованием. MBL1 относится к семейству коллагенозных лектинов – уникальной группе паттерн-распознающих рецепторов (PRR), которые выполняют ключевую роль в системе врожденного иммунитета. Эти белки обладают способностью специфически связываться с углеводными структурами на поверхности патогенных микроорганизмов, запуская каскад защитных реакций. У крупного рогатого скота идентифицировано одиннадцать генов коллагеновых лектинов, включая гены, кодирующие маннозосвязывающие лектины A и C (*MBL1* и *MBL2*), белки сурфактанта (*SFTPA1* и *SFTPD*), а также различные коллектины и фиколины, каждый из которых обладает уникальными структурно-функциональными особенностями [4].

Ген *MBL1*, локализованный на 28-й хромосоме (BTA28), состоит из четырех экзонов и кодирует белок длиной 249 аминокислот, относящийся к кальций-зависимым коллектинам [5, 6, 7]. Хотя первоначально основная роль *MBL1* рассматривалась исключительно в контексте иммунного ответа [8], современные исследования выявили его участие в регуляции широкого спектра физиологических процессов, включая метаболизм липидов и белков молока [9]. Важно отметить, что экспрессия *MBL1* существенно изменяется в зависимости от физиологического состояния животного. Синтезируемый преимущественно в печени, этот белок демонстрирует повышенную экспрессию в период лактации [10, 11], что позволяет предположить его непосредственное влияние на процессы молокообразования.

Особую актуальность изучение однонуклеотидного полиморфизма (*Single Nucleotide Polymorphism*, SNP 2569_T→C) гена *MBL1* приобретает в контексте современных тенденций селекции молочного скота. Интенсивный отбор по продуктивным признакам, с одной стороны, позволил существенно увеличить удой, но с другой – привел к снижению естественной резистентности животных и сокращению их продуктивного долголетия [12, 13]. В этом аспекте холмогорская порода представляет

особый интерес как пример успешного сочетания высокой молочной продуктивности с выдающейся адаптивностью. Сформированная в суровых условиях Приарктической зоны России эта порода характеризуется не только стабильными удоями, но и повышенной устойчивостью к холодовому стрессу и связанным с ним заболеваниям. Уникальный генетический фонд холмогорского скота делает его перспективной моделью для изучения взаимосвязи между генетическими маркерами и продуктивными качествами.

Проведенные ранее исследования выявили значительную вариабельность аллельных частот гена *MBL1* в различных популяциях крупного рогатого скота, однако данные о его ассоциациях с молочной продуктивностью у холмогорской породы остаются малоизученными. В частности, требуют уточнения вопросы о влиянии конкретных генотипов *MBL1* на качественный состав молока, включая содержание жира и белка.

Цель исследования – изучить ассоциации полиморфизма гена *MBL1* (SNP 2569_T→C) с показателями молочной продуктивности (удой, содержание жира и белка) у коров холмогорской породы. Особое внимание уделялось анализу взаимосвязи генотипических особенностей с качественными характеристиками молока на разных стадиях лактации, что позволит разработать научно обоснованные рекомендации по использованию *MBL1* в качестве молекулярного маркера в селекционной работе.

Научная новизна – впервые получены новые знания об ассоциативной связи генотипов *MBL1* с качественными и количественными характеристиками молока на разных стадиях лактации у современной популяции коров холмогорской породы в АО «Холмогорский племзавод».

Материал и методы. Генетические исследования проводили на базе лаборатории инновационных технологий в АПК ФГБУН Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук. В качестве объекта исследования использовали образцы ДНК коров холмогорской породы (n = 430), содержащихся в АО «Холмогорский племзавод» Архангельской области.

Для анализа полиморфизма гена *MBL1* (SNP 2569_T→C) применяли метод полимеразной цепной реакции с последующим определением длин рестрикционных фрагментов (ПЦР-ПДРФ). Амплификацию целевого фрагмента гена *MBL1* размером 255 пар нуклеотидов (п. н.) проводили с использованием специфических праймеров:

прямого 5'-GTGGTGGCAAATGTTGGCTAAAC-3';
обратного 5'-TGGCTCTCCCTTTTCTCCCTT-3'[14].

ПЦР выполняли на амплификаторе MiniAmp Plus по следующему протоколу: предварительная денатурация при температуре +94 °С в течение 5 мин (1 цикл); 35 циклов амплификации, включающих денатурацию при температуре +94 °С (30 сек), отжиг – при +63,5 °С (30 сек) и элонгацию – при +72 °С (30 сек); финальную элонгацию при температуре +72 °С в течение 8 мин (1 цикл).

Полученные ПЦР-продукты подвергали рестрикции эндонуклеазой HaeIII с последующим электрофоретическим разделением в агарозном геле. В результате рестрикционного анализа выявляли три генотипа – *TT* (255 п. н.), *TC* (255/178/77 п. н.) и *CC* (178/77 п. н.) (рис. 1).

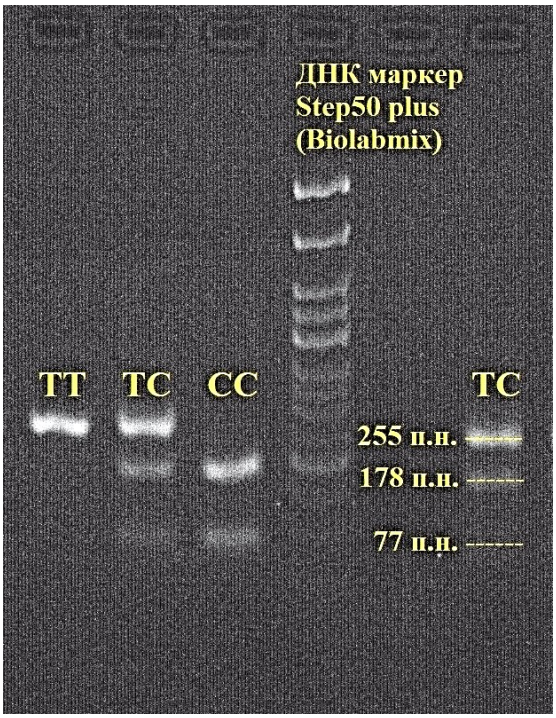


Рис. 1 **Электрофореграмма продуктов ПЦР-ПДРФ анализа полиморфизма гена *MBL1* у крупного рогатого скота холмогорской породы:** М – маркер молекулярной массы (100 п. н.). На дорожках представлены генотипы: 1 – *TT*, 2 – *TC*, 3 – *CC* /

Fig. 1 **Electropherogram of PCR-RFLP analysis products of the *MBL1* gene polymorphism in the Kholmogory breed cattle:** M – molecular weight marker (100 b. p). Lanes represent the genotypes: 1 – *TT*, 2 – *TC*, 3 – *CC*

Статистическую обработку цифрового материала проводили методами вариационной статистики. Вследствие отсутствия нормального распределения количественные данные описывали с помощью медианы (Me), нижнего и верхнего квартилей (Q1–Q3). Далее сравнение групп выполняли с помощью U-критерия Манна-Уитни. Различия показателей между группами считали статистически значимыми при $p<0,05$.

Результаты и их обсуждение. Для проведения исследований отобрали 430 коров холмогорской породы АО «Холмогорский племзавод», частота встречаемости генетических вариантов по локусу *MBL1* представлена на рисунке 2.

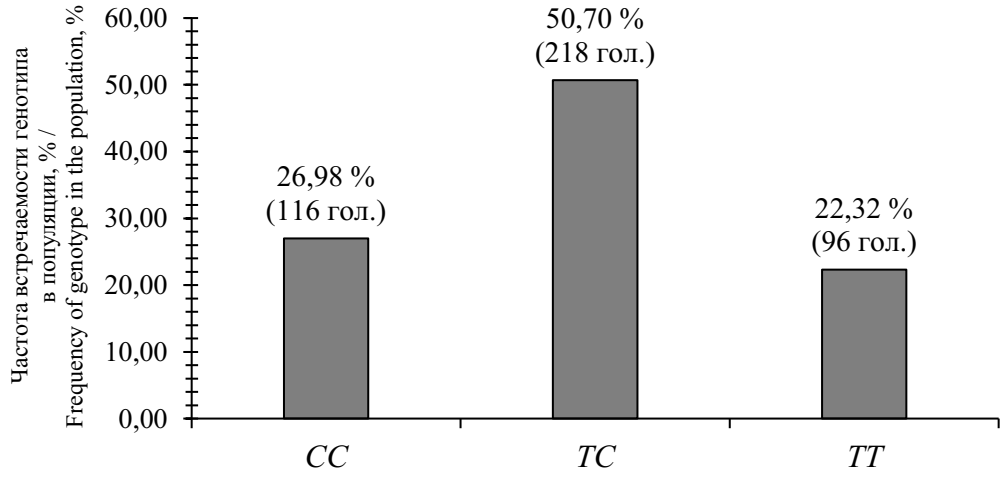


Рис. 2. **Частота встречаемости генотипов гена *MBL1* у коров холмогорской породы /**
Fig. 2. **The frequency of the gene *MBL1* genotypes in the Kholmogory breed cows**

В ходе проведенного генетического анализа установлено, что гетерозиготный генотип *TC* демонстрирует наибольшую распространенность в изучаемой популяции. Гомозиготный вариант *CC* был зафиксирован у значительной части особей, тогда как генотип *TT* характеризовался наименьшей частотой встречаемости.

Значение критерия хи-квадрат ($\chi^2 = 0,11$) свидетельствует о соответствии наблюдаемого распределения генотипов ожидаемому по закону Харди-Вайнберга. Это указывает на то, что в исследуемой популяции холмогорского скота, содержащегося в условиях контролируемого воспроизводства, сохраняется генетическое равновесие по изучаемому локусу.

Результаты показателей молочной продуктивности по последней законченной лактации коров холмогорской породы, разделенных на группы с различными генотипами гена лектина, представлены в таблице.

При анализе удоя у коров-первотелок отмечены минимальные различия между генотипами от 6801 до 6956 кг. Следует отметить существенный квартильный размах внутри каждой группы, особенно выраженный у животных с генотипом *TC* (6075–7625 кг), которые имели наибольший показатель удоя – 6956 кг. По содержанию жира в молоке наблюдается более выраженная дифференциация: максимальный показатель зафиксирован у особей с генотипом *TC* (3,66 %), группа коров с генотипом *TT* показывает минимальное значение (3,41 %). Содержание белка в молоке остается относительно стабильным у всех групп животных (3,28–3,32 %).

У коров по второй лактации средний удой в группе животных с генотипом *CC* составил 7687 кг (межквартильный размах 6336–8371 кг). В группе коров с генотипом *TC* удой был выше на 69 кг – 7756 кг (6707–8603 кг), в группе особей с генотипом *TT* достиг 8047 кг (6700–8390 кг). Содержание жира в молоке варьировало незначительно: в группе животных с генотипом *CC* – 3,61 % (3,38–3,88 %); *TC* – 3,63 % (3,36–4,01 %); с генотипом *TT* – 3,49 % (3,21–3,93 %). Наибольшие различия между группами у коров по второй лактации наблюдали по содержанию белка в молоке. В группе животных с генотипом *CC* этот показатель составил 3,33 % (3,18–3,48 %), с генотипом *TC* статистически значимо ниже – 3,31 % (3,23–3,52 %), с генотипом *TT* – 3,21 % (3,12–3,30 %).

Таблица – **Показатели молочной продуктивности по последней законченной лактации коров холмогорской породы с различными генотипами гена *MBL1* /**
Table – **Milk production indicators for the last completed lactation in Kholmogory cows with different gene *MBL1* genotypes**

Генотип / Genotype	*Показатель / Indicator*	*CC*	*Кол-во, гол. / Number, heads*	*TC*	*Кол-во, гол. / Number, heads*	*TT*	*Кол-во, гол. / Number, heads*
1-я лактация / 1st lactation	Удой, кг / Yield, kg	6952 (6466–7381)	17	6956 (6075–7625)	45	6801 (6399–7526)	21
	Жир, % / Fat, %	3,58 (3,36–3,92)		3,66 (3,34–3,82)		3,41 (3,30–3,73)	
	Белок, % / Protein, %	3,32 (3,22–3,53)		3,32 (3,18–3,43)		3,28 (3,11–3,38)	
2-я лактация / 2nd lactation	Удой, кг / Yield, kg	7687 (6336–8371)	28	7756 (6707–8603)	53	8047 (6700–8390)	19
	Жир, % / Fat, %	3,61 (3,38–3,88)		3,63 (3,36–4,01)		3,49 (3,21–3,93)	
	Белок, % / Protein, %	3,33 (3,18–3,48)		**3,31 (3,23–3,52)***		**3,21 (3,12–3,30)***	
3-я и более лактация / 3rd and subsequent lactation	Удой, кг / Yield, kg	7260 (6493–8199)	71	**7678 (6715–8349)***	120	**7112 (6120–7954)***	56
	Жир, % / Fat, %	**3,91 (3,46–4,45)***		3,72 (3,46–4,09)		**3,75 (3,40–4,04)***	
	Белок, % / Protein, %	3,29 (3,14–3,42)		3,26 (3,15–3,41)		3,27 (3,13–3,40)	
Итого / Total	Удой, кг / Yield, kg	7288 (6458–8148)	116	7467 (6490–8333)	218	7156 (6369–8036)	96
	Жир, % / Fat, %	**3,75 (3,43–4,22)***		3,69 (3,41–4,03)		**3,60 (3,36–3,93)***	
	Белок, % / Protein, %	3,30 (3,17–3,43)		3,29 (3,16–3,43)		3,26 (3,12–3,38)	

Примечания: * отмечены достоверные различия между группами животных с генотипами *CC*, *TC* и *TT* (значения показателей выделены жирным шрифтом) при $p \leq 0,05$; в скобках указано значение нижнего и верхнего квартилей (Q1–Q3) /
Notes: * significant differences between groups of animals with genotypes *CC*, *TC* and *TT* (the values of the indicators are highlighted in bold), $p \leq 0.05$; the lower and upper quartiles (Q1–Q3) are shown in parentheses

Молочная продуктивность у полновозрастных животных по третьей и более лактациям зафиксирована в интервале от 7112 до 7678 кг молока. В группе коров с генотипом *CC* этот показатель составил 7260 кг (межквартильный размах 6493–8199 кг), в группе животных с генотипом *TC* удой был достоверно выше – 7678 кг (6715–8349 кг), а с генотипом *TT*, напротив, ниже – 7112 кг (6120–7954 кг). По содержанию жира в молоке выявлены значимые различия: в группе коров с генотипом *CC* показатель составил 3,91 % (3,46–4,45 %), что достоверно превышало показатели животных с генотипами *TC* – 3,72 % (3,46–4,09 %) и *TT* – 3,75 % (3,40–4,04 %). По содержанию белка существенных различий между группами не выявлено, значения варьировали в пределах 3,26–3,29 %.

Средний удой за все лактации у коров с генотипом *CC* составил 7288 кг (6458–8148 кг), с генотипом *TC* – 7467 кг (6490–8333 кг), с генотипом *TT* – 7156 кг (6369–8036 кг). Содержание жира в молоке оставалось наиболее высоким в группе коров с генотипом *CC* – 3,75 % (3,43–4,22 %), что достоверно отличалось от групп животных с генотипом *TC* 3,69 % (3,41–4,03 %) и *TT* 3,60 % (3,36–3,93 %). Показатели содержания белка были схожими во всех трех группах, не имели достоверных различий и превышали стандарт породы, составляющий 3,20 %.

В работе Н. С. Ульянова и соавт. изучалась связь полиморфизма гена *MBL1* с молочной продуктивностью у коров черно-пестрой породы [15]. Анализ полиморфизма *MBL1* показал следующее распределение генотипов в выборке из 181 коровы: *TT* – 20 % (37 гол.), *TC* – 52 % (93 гол.), *CC* – 28 % (51 гол.).

Частота аллелей для *T* составила 0,461, для *C* – 0,539, что указывает на небольшое преобладание аллеля *C* в популяции. По данным исследования, коровы с гетерозиготным генотипом *TC* показали максимальный удой за 305 дней лактации (3248 кг), превысив средний показатель по выборке (3108,1 кг). Минимальный удой зафиксирован у животных с генотипом *CC* (2882,1 кг). Различия по содержанию жира в молоке были менее выражены: у коров с генотипом *TT* этот показатель составил 3,97 %, что незначительно выше, чем с генотипами *TC* (3,83 %) и *CC* (3,82 %). Содержание белка в молоке между группами существенно не различалось и соответствовало среднему по популяции. Эти результаты подчеркивают ассоциацию гетерозиготного генотипа *TC* с более высокими удоями, что частично перекликается с нашими данными по холмогорской породе, где генотип *TC* также ассоциирован с повышенным удоем (7467 кг в среднем по всем лактациям), хотя в нашей популяции преобладание аллеля *C* менее выражено (частота 0,52 против 0,539), а влияние на жирность молока противоположно – в нашей работе жирность выше у генотипа *CC*.

Л. В. Абдуллина и Г. Р. Юсупова провели анализ полиморфизма гена *MBL1* у 387 первотелок голштинской породы, оценивая его связь с молочной продуктивностью и устойчивостью к маститу [6]. Распределение генотипов было следующим: *CC* – 41,6 % (161 гол.); *TC* – 43,4 % (168 гол.); *TT* – 15,0 % (58 гол.). Частота аллелей для *C* составила 0,63, для *T* – 0,37, что свидетельствует о значительном преобладании аллеля *C*. Гетерозиготный генотип *TC* был наиболее распространенным. Анализ молочной продуктивности показал, что коровы с генотипом *TC* имели наивысший удой (6425 кг), превосходя животных с генотипами *CC* и *TT* на 320 кг и 157 кг соответственно. По содержанию белка в молоке также наблюдали преимущество генотипа *TC* по сравнению с другими генотипами. Коровы с генотипом *CC* демонстрировали более высокое содержание жира в молоке (3,90 %), лидируя по сравнению с другими группами. По выходу молочного белка и жира животные с генотипом *TC* также занимали лидирующие позиции. В сравнении с нашими результатами по холмогорской породе, где удой у *TC* максимален (7467 кг в среднем), отмечено схожее преимущество гетерозигот, однако в голштинской породе преобладание аллеля *C* сильнее (0,63 против 0,52 в нашей работе), а жирность выше у генотипа *CC*, что совпадает с нашими данными (3,75 %).

В исследовании, проведенном А. Камалдип с соавт. (A. Kamaldeep et al.), рассматривалась частота встречаемости гена *MBL1* у популяции сахивальской породы крупного рогатого скота на выборке из 24 животных [16]. В результате получили следующее распределение генотипов: *CC* составили 37 % (9 гол.); *CT* – 46 % выборки (11 гол.); *TT* встречались с частотой 17 % (4 гол.). Аллельный анализ продемонстрировал преобладание аллеля *C* с частотой встречаемости 0,60. По сравнению с нашими данными по холмогорской породе, где гетерозиготный генотип *TC* также преобладает, но с более сбалансированным соотношением аллелей (0,52 для *C* и 0,48 для *T*), в сахивальской породе аллель *C* доминирует сильнее (0,60), хотя данные о продуктивности не приведены, что не позволяет напрямую сравнить удои, но подтверждает общую тенденцию к равновесию в селекционируемых популяциях.

В работе Дж. М. Киичи с соавт. (J. M. Kiyici et al.) авторы исследовали три однонуклеотидных полиморфизма у коров голштинской породы, в том числе и рассмотренный нами в данной статье [17]. Ученые выявили преобладание генотипа *TC* над остальными: из 166 изученных особей генотип *TC* имели 129, что составило 78 % от общей выборки. Генотип *CC* имели 22 головы (13 %), *TT* – 15 (10 %). Частота встречаемости аллелей *C* и *T* практически одинакова – 58 и 53 % соответственно. Изучая коров голштинской породы, авторы обнаружили достоверно бóльший процент жира в молоке у особей с генотипом *TT* (3,47 %), наименьшее значение с генотипом *TC* (3,13 %). Животные с генотипом *TT* имели самую высокую массовую долю белка в молоке (3,66 %), с генотипом *CC* – самую низкую (3,40 %). Однако наибольший удой имели коровы с генотипом *CC* – 8897 кг за 305 дней лактации, наименьший удой с генотипом *TT* – 7468 кг. В отличие от наших результатов, где удой максимален у генотипа *TC* (7467 кг), а жирность выше у *CC* (3,75 %), в этой работе преимущество по удою у генотипа *CC*, а по жирности и белку – у *TT*, хотя преобладание гетерозигот *TC* схоже (но сильнее – 78 % против нашей популяции), а соотношение аллелей сбалансировано, как в нашем исследовании.

В исследовании Л. В. Шамсиевой объектом изучения выступали первотелки голштинской породы [18]. Общий объем выборки составил

366 особей. Проведенный анализ полиморфизма изучаемого генетического маркера позволил выявить следующее распределение генотипов в исследуемой популяции: гомозиготный генотип *CC* зарегистрирован у 112 животных, или 30,6 % от общего поголовья; гетерозиготный генотип *TC* – у 194 особей (53,0 %); гомозиготный генотип *TT* – у 60 голов (16,4 %). Полученные данные демонстрируют преобладание гетерозиготного генотипа *TC* в исследуемой популяции. По сравнению с нашими данными, где гетерозиготы *TC* также доминируют, распределение генотипов близко (*TC* ~53 % против нашего преобладающего *TC*), хотя данные о продуктивности не детализированы, что ограничивает сравнение удоев, но подтверждает общую тенденцию преобладания *TC* в голштинской породе, с менее сбалансированным соотношением аллелей по сравнению с холмогорской (где *C* и *T* ближе к 0,5).

Следует отметить, что результаты исследований других пород (черно-пестрой, голштинской, сахивальской) демонстрируют как общие закономерности (преобладание гетерозиготного варианта), так и породные особенности распределения аллелей. В частности, в холмогорской породе наблюдается более сбалансированное соотношение аллелей (частота аллеля *C* – 0,52, аллеля *T* – 0,48) по сравнению с голштинским скотом, где отмечается выраженное преобладание аллеля *C* (0,63). Полученные данные подтверждают важность учета породной специфики при использовании генетических маркеров в селекционной работе.

Заключение. Молекулярно-генетический анализ поголовья коров холмогорской породы по гену маннозосвязывающего лектина (*MBL1*) выявил преобладание генотипа *TC* (218 гол.), что составляет 50,70 % от общей выборки.

В ходе исследования установлено статистически значимое превышение содержания жира в молоке у коров с генотипом *CC*. Показатель на 0,06 % превышал значение для группы с генотипом *TC* (3,69 %) и на 0,15 % – с *TT* (3,60 %).

На основании полученных результатов исследования полиморфизма гена *MBL1* у коров холмогорской породы, можно рекомендовать применение гена *MBL1* в программе селекционной работы для целенаправленного формирования высокопродуктивного стада. Полученные данные свидетельствуют о целесообразности использования животных с генотипом *CC* при формировании племенного ядра. Для оптимизации селекционного процесса представляется рациональным комбинировать носителей аллеля *C* с животными, обладающими высокими показателями удоя, что позволит одновременно улучшать как количественные, так и качественные характеристики молочной продуктивности. Особое внимание следует уделить систематическому мониторингу генетической структуры стада, что обеспечит исключение нежелательных сдвигов аллельных частот и поддержание оптимального баланса между продуктивными и адаптивными признаками.

Перспективным направлением дальнейших научных изысканий представляется углубленное изучение эпистатических взаимодействий гена *MBL1* с другими генами-кандидатами, ассоциированными с молочной продуктивностью, а также комплексный анализ его влияния на резистентность животных к распространенным заболеваниям. Внедрение этих результатов в племенной учёт и селекцию повысит эффективность молочного скотоводства в Архангельской области и других регионах со схожими условиями.

Список литературы

1. Амерханов Х. А. Состояние и развитие молочного скотоводства в Российской Федерации. Молочное и мясное скотоводство. 2017;(1):2–5. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=28392306 EDN: XXIANR

2. Пестис В. К., Пешко В. В., Епишко О. А., Ситько А. А. Применение ДНК-тестирования крупного рогатого скота по генам LTF и MBL1 для повышения эффективности производства молока. Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2022;66(1):122–128. DOI: https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-1-122-128 EDN: FKLKCN

3. Сафина Н. Ю., Зиннатова Ф. Ф., Шакиров Ш. К., Гайнутдинова Э. Р., Фаттахова З. Ф. Полиморфизм гена манноза-связывающего лектина 1 (MBL1) в популяции голштинского скота Республики Татарстан. Аграрный научный журнал. 2021;(9):71–74. DOI: https://doi.org/10.28983/asj.y2021i9pp71-74 EDN: KHDCKT

4. Fraser R. S., Lumsden J. S., Lillie B. N. Identification of polymorphisms in the bovine collagenous lectins and their association with infectious diseases in cattle. Immunogenetics. 2018;(70):533–546. DOI: https://doi.org/10.1007/s00251-018-1061-7

5. Кулешова Е. А., Бондаренко М. В. Генетическая устойчивость коров к маститу. Животноводство России. 2019;(S1):9–11. DOI: https://doi.org/10.25701/ZZR.2019.56.43.005 EDN: IIZAHB

6. Абдуллина Л. В., Юсупова Г. Р. Ген манноза-связывающего лектина (MBL), и влияние его полиморфизма на устойчивость коров к маститу. Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины имени Н. Э. Баумана. 2019;238(2):4–8. DOI: https://doi.org/10.31588/2413-4201-1883-238-2-4-9 EDN: OKVEZT

7. Khan M. Z., Wang J., Ma Y., Chen T., Ma M., Ullah Q. et al. Genetic polymorphisms in immune- and inflammation-associated genes and their association with bovine mastitis resistance/susceptibility. Frontiers in Immunology. 2023;14:1082144. DOI: https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1082144

8. Aksel E. G., Akçay A., Çelik E. B., Akyüz B. Investigation of the effect for three SNP (1252 G>A, 2534 G>A, 2569 T>C) of MBL-1 gene on subclinic mastitis in Simmental cows. Journal of the Turkish Veterinary Medical Society. 2022;93(1):18–27. DOI: https://doi.org/10.33188/vetheder.987047

9. Muhasin N. A., Bhushan B., Panigrahi M., Dewangan P. Association study of genetic variants at single nucleotide polymor phism rs109231409 of mannose-binding lectins 1 gene with mastitis susceptibility in Vrindavani crossbred cattle. Veterinary World. 2014;7(10):807–810 DOI: https://doi.org/10.14202/vetworld.2014.807-810

10. Кадралиева Б. Т. Влияние различных факторов на уровень соматических клеток в молоке коров. Аграрный вестник Верхневолжья. 2016;(4):42–46. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=27631495 EDN: XGRDYB

11. Зиннатова Ф. Ф., Алимов А. М., Зиннатов Ф. Ф. Взаимосвязь состояния комплексных генотипов генов CSN3, DGAT1, TG5, PRL, LGB и показатели молочной продуктивности крупного рогатого скота. Вопросы нормативно-правового регулирования в ветеринарии. 2014;(2):120–123.
Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=21634266 EDN: SFKZNN

12. Пешко В. В., Пестис В. К., Пестис П. В., Епишко О. А., Ситько А. А., Пешко Н. Н. Использование генов манноза-связывающего лектина (MBL1) и лактоферрина (LTF) в селекции крупного рогатого скота. Сельское хозяйство – проблемы и перспективы: сб. научн. тр. Гродно: Гродненский ГАУ, 2021. Т. 52. С. 112–124. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=48108774 EDN: ZJPEHN

13. Kamaldeep A., Magotra A., Pander B. L., Dalal D. S., Malik B. S., Garg A. R., Malik A. Evaluation of candidate genotype of immune gene MBL1 associated with udder health and performance traits in dairy cattle and buffalo of India. Tropical Animal Health and Production. 2021;53(4):429. DOI: https://doi.org/10.1007/s11250-021-02865-2

14. Aksel E. G., Akçay A., Arslan K., Sohel M. H., Güngör G., Akyüz B. The Eff ects of MBL1 Gene Polymorphism on Subclinical Mastitis in Holstein Cows. Journal of the Faculty of Veterinary Medicine of the Caucasian University. 2021;27(3):389–395. DOI: https://doi.org/10.9775/kvfd.2021.25714

15. Ульянов В. А., Гинаятов Н. С., Байменов Б. М., Маликзада К. М., Мендыбаева А. Б. Предпочтительные и нежелательные генотипы генов GH, IGF-1, MBL1 и LTF среди поголовья черно-пестрой породы по признакам молочной продуктивности и качества молока. Наука и образование. 2023;(1-1(70)):78–86.
DOI: https://doi.org/10.52578/2305-9397-2023-1-1-78-87 EDN: PBRENR

16. Kamaldeep A., Magotra A., Pander B. L., Malik A., Garg A. R., Dalal D. S., Malik B. S. Association of G.2686T>C mutation of MBL1 gene with reproduction traits in sahiwal cattle. International Journal of Agricultural Science and Research. 2017;7(6):159–164.
URL: https://www.researchgate.net/publication/373020228_ASSOCIATION_OF_G2686TC_MUTATION_OF_MBL1_GENE_WITH_REPRODUCTION_TRAITS_IN_SAHIWAL_CATTLE

17. Kiyici J. M., Daldaban F., Arslan K., Akyüz B., Kaliber M., Cinar M. U. Effect of Mannose-Binding Lectin (protein A) 1 (MBL1) Gene Polymorphisms on Milk Production Traits and Somatic Cell Count in Holstein Dairy Cattle. Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society. 2025;76(1):8779–8784.
DOI: https://doi.org/10.12681/jhvms.37676

18. Шамсиева Л. В. Физико-химические показатели молока при субклиническом мастите коров. Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н. Э. Баумана. 2017;232(4):159–162. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=30693505 EDN: ZVRHYF

References

1. Amerkhanov Kh. A. Status and development of dairy cattle farming in the Russian Federation. *Molochnoye i myasnoye skotovodstvo* = Journal of Dairy and Beef Cattle Farming. 2017;(1):2–5. (In Russ.).
URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=28392306

2. Pestis V. K., Peshko V. V., Epishko O. A., Sitko A. A. Using of DNA-testing of cattle for the LTF and MBL1 genes to increase the milk production efficiency. *Dokladi Natsionalnoy akademii nauk Belarusi*. 2022;66(1):122–128. (In Belarus). DOI: https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-1-122-128

3. Safina N. Yu., Zinnatova F. F., Shakirov Sh. K., Gaynutdinova E. R., Fattakhova Z. F. Polymorphism of MBL1 gene in holstein cattle of Republic of Tatarstan. *Agrarny nauchny zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2021;(9):71–74. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.28983/asj.y2021i9pp71-74

4. Fraser R. S., Lumsden J. S., Lillie B. N. Identification of polymorphisms in the bovine collagenous lectins and their association with infectious diseases in cattle. Immunogenetics. 2018;(70):533–546. DOI: https://doi.org/10.1007/s00251-018-1061-7

5. Kuleshova E. A., Bondarenko M. V. Genetic resistance of cows to mastitis. *Zhivotnovodstvo Rossii*. 2019;(S1):9–11. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.25701/ZZR.2019.56.43.005

6. Abdullina L. V., Yusupova G. R. Gene mannose binding lectin (MBL) and its influence of polymorphism on resistance of cows to mastitis. *Ucheniye zapiski Kazanskoy gosudarstvennoy akademii veterinarnoy meditsini imeni N. E. Baumana* = Scientific Notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine. 2019;238(2):4–8. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.31588/2413-4201-1883-238-2-4-9

7. Khan M. Z., Wang J., Ma Y., Chen T., Ma M., Ullah Q. et al. Genetic polymorphisms in immune- and inflammation-associated genes and their association with bovine mastitis resistance/susceptibility. Frontiers in Immunology. 2023;14:1082144. DOI: https://doi.org/10.3389/fimmu.2023.1082144

8. Aksel E. G., Akçay A., Çelik E. B., Akyüz B. Investigation of the effect for three SNP (1252 G>A, 2534 G>A, 2569 T>C) of MBL-1 gene on subclinic mastitis in Simmental cows. Journal of the Turkish Veterinary Medical Society. 2022;93(1):18–27. DOI: https://doi.org/10.33188/vetheder.987047

9. Muhasin N. A., Bhushan B., Panigrahi M., Dewangan P. Association study of genetic variants at single nucleotide polymor phism rs109231409 of mannose-binding lectins 1 gene with mastitis susceptibility in Vrindavani crossbred cattle. Veterinary World. 2014;7(10):807–810 DOI: https://doi.org/10.14202/vetworld.2014.807-810

10. Kadraliyeva B. T. Influence of various factors on the somatic cells level in cow"s milk. *Agrarnyy vestnik Verkhnevolzhya* = Agrarian Journal of Upper Volga Region. 2016;(4):42–46. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=27631495

11. Zinnatova F. F., Alimov A. M., Zinnatov F. F. States of the complex relationship of gene genotypes CSN3, DGAT1, TG5, PRL, LGB and indicators of milk productivity of cattle. *Voprosi normativno-pravovogo regulirovaniya v veterinarii*. 2014;(2):120–123. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=21634266

12. Peshko V. V., Pestis V. K., Pestis P. V., Yepishko O. A., Sitko A. A., Peshko N. N. Using of mannose-binding lectins (MBL1) gene and lactofferin gene (LTF) in cattle selection. Agriculture – problems and prospects: collection of scientific articles. Grodno: *Grodnensky GAU*, 2021. Vol. 52. pp. 112–124. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=48108774

13. Kamaldeep A., Magotra A., Pander B. L., Dalal D. S., Malik B. S., Garg A. R., Malik A. Evaluation of candidate genotype of immune gene MBL1 associated with udder health and performance traits in dairy cattle and buffalo of India. Tropical Animal Health and Production. 2021;53(4):429. DOI: https://doi.org/10.1007/s11250-021-02865-2

14. Aksel E. G., Akçay A., Arslan K., Sohel M. H., Güngör G., Akyüz B. The Eff ects of MBL1 Gene Polymorphism on Subclinical Mastitis in Holstein Cows. Journal of the Faculty of Veterinary Medicine of the Caucasian University. 2021;27(3):389–395. DOI: https://doi.org/10.9775/kvfd.2021.25714

15. Ulyanov V. A., Ginayatov N. S., Baymenov B. M., Malikzada K. M., Mendibayeva A. B. Preferred and undesirable genotypes of GH, IGF-1, MBL1 and LTF genes in black-and-white breed for milk productivity and milk quality traits. *Nauka i obrazovaniye*. 2023;(1-1(70)):78–86. (In Kazakhstan). DOI: https://doi.org/10.52578/2305-9397-2023-1-1-78-87

16. Kamaldeep A., Magotra A., Pander B. L., Malik A., Garg A. R., Dalal D. S., Malik B. S. Association of G.2686T>C mutation of MBL1 gene with reproduction traits in sahiwal cattle. International Journal of Agricultural Science and Research. 2017;7(6):159–164. URL: https://www.researchgate.net/publication/373020228_ASSOCIATION_OF_G2686TC_MUTATION_OF_MBL1_GENE_WITH_REPRODUCTION_TRAITS_IN_SAHIWAL_CATTLE

17. Kiyici J. M., Daldaban F., Arslan K., Akyüz B., Kaliber M., Cinar M. U. Effect of Mannose-Binding Lectin (protein A) 1 (MBL1) Gene Polymorphisms on Milk Production Traits and Somatic Cell Count in Holstein Dairy Cattle. Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society. 2025;76(1):8779–8784. DOI: https://doi.org/10.12681/jhvms.37676

18. Shamsiyeva L. V. Physico-chemical characteristics of milk in subclinical mastitis cows. *Ucheniye zapiski Kazanskoy gosudar-stvennoy akademii veterinarnoy meditsini im. N. E. Baumana* = Scientific Notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine. 2017;232(4):159–162. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=30693505

Вклад авторов: Худякова Н. А., Кожевникова И. С. – концепция и план исследования, анализ данных, подготовка рукописи; Ступина А. О., Классен И. А. – анализ данных, подготовка рукописи; Кашин А. С. – анализ данных.

Сведения об авторах

✉ **Худякова Наталья Александровна**, кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник лаборатории инновационных технологий в АПК, ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, пр-кт Никольский, д. 20, г. Архангельск, Российская Федерация, 163000, e-mail: dirnauka@fciarctic.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1302-2965,** e-mail: nata070707hudyakova@yandex.ru

Кожевникова Ирина Сергеевна, кандидат биол. наук, заведующая лабораторией инновационных технологий в АПК, ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, пр-кт Никольский, д. 20, г. Архангельск, Российская Федерация, 163000, e-mail: dirnauka@fciarctic.ru; доцент кафедры биологии человека и биотехнических систем, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова», Набережная Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Российская Федерация, 163002, e-mail: public@narfu.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7194-9465**

Ступина Александра Олеговна, младший научный сотрудник лаборатории инновационных технологий в АПК, ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, пр-кт Никольский, д. 20, г. Архангельск, Российская Федерация, 163000, e-mail: dirnauka@fciarctic.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7664-3684**

Классен Инга Андреевна, младший научный сотрудник лаборатории инновационных технологий в АПК, ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, пр-кт Никольский, д. 20, г. Архангельск, Российская Федерация, 163000, e-mail: dirnauka@fciarctic.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4421-6087**

Кашин Андрей Сергеевич, младший научный сотрудник лаборатории инновационных технологий в АПК, ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, пр-кт Никольский, д. 20, г. Архангельск, Российская Федерация, 163000, e-mail: dirnauka@fciarctic.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1155-0339**

Author contributions: Khudyakova N. A., Kozhevnikova I. S. – research concept and plan, data analysis, manuscript preparation; Stupina A. O., Klassen I. A. – data analysis, manuscript preparation; Kashin A. S. – data analysis.

Information about the authors

✉ **Natalia A. Khudyakova**, PhD in Agricultural Science, senior researcher, the Laboratory of Innovative Technologies in Agro-Industrial Complex, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 20 Nikolsky Avenue, Arkhangelsk, Russian Federation, 163000, e-mail: dirnauka@fciarctic.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1302-2965,** e-mail: nata070707hudyakova@yandex.ru

Irina S. Kozhevnikova, PhD in Biological Science, Head of the Laboratory of Innovative Technologies in Agro-Industrial Complex, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 20 Nikolsky Avenue, Arkhangelsk, Russian Federation, 163000, e-mail: dirnauka@fciarctic.ru; associate professor at the Department of Human Biology and Biotechnical Systems, Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Severnaya Dvina Emb. 17, Arkhangelsk, Russian Federation, 163002, e-mail: public@narfu.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7194-9465**

Alexandra O. Stupina, junior researcher, the Laboratory of Innovative Technologies in Agro-Industrial Complex, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 20 Nikolsky Avenue, Arkhangelsk, Russian Federation, 163000, e-mail: dirnauka@fciarctic.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7664-3684**

Inga A. Klassen, junior researcher, the Laboratory of Innovative Technologies in Agro-Industrial Complex, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 20 Nikolsky Avenue, Arkhangelsk, Russian Federation, 163000, e-mail: dirnauka@fciarctic.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4421-6087**

Andrey S. Kashin, junior researcher, the Laboratory of Innovative Technologies in Agro-Industrial Complex, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 20 Nikolsky Avenue, Arkhangelsk, Russian Federation, 163000, e-mail: dirnauka@fciarctic.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1155-0339**

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.435–447
УДК 636.082.12:636.32/.38.082.13

(cc) BY

Поиск полиморфизмов гена *FRY*, связанных с параметрами живой массы у баранов породы манычский меринос

© 2026. А. Ю. Криворучко[1, 2], Л. Н. Скорых[1, 2], О. Н. Криворучко[1], А. А. Каниболоцкая[1]✉, О. А. Яцык[1], Л. В. Кононова[1], Е. Ю. Сафарян[1, 2]
[1]ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», г. Михайловск, Ставропольский край, Российская Федерация,
[2]ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Ставрополь, Российская Федерация

Применение современных методов генетического тестирования позволяет дополнить традиционную селекцию новыми способами прогнозирования хозяйственно полезных качеств у животных. Для улучшения параметров мясной продуктивности у овец российской селекции используется выявление маркеров в генах, связанных с развитием мышечной ткани. Одним из перспективных генов-кандидатов, выявленных в различных исследованиях методом полногеномного поиска ассоциаций, является FRY, продукт которого принимает участие в формировании цитоскелета. В работе выполнено полногеномное секвенирование ДНК баранов породы манычский меринос, по результатам которого изучена структура гена FRY. В составе гена обнаружено несколько тысяч различных полиморфизмов, преимущественно – однонуклеотидных замен. Проведенное исследование связи отдельных полиморфизмов с параметрами живой массы у манычских мериносов позволило описать 46 локусов, показавших наибольшие различия между носителями разных аллелей по изучаемому параметру. На основании анализа результатов выделены три полиморфизма в позициях 29188932, 29071055 и 29219339 на 10-й хромосоме. Достоверная разница в средней живой массе между носителями аллельных вариантов по этим заменам имела наибольшую величину. Носители мутантного аллеля по полиморфизму 29188932 имели средний живой вес больше на 26 %, гомозиготы по замене в позиции 29071055 были больше остальных животных на 8,54 кг (18 %). Бараны с мутантным гомозиготным генотипом в позиции 29219339 превосходили остальных на 12,07 кг, что составляет 25 %. Все три полиморфизма – 29188932, 29071055 и 29219339 являются однонуклеотидными заменами. Замены в точках 29071055 и 29219339 ранее описаны у овец и имеют номенклатурные номера rs413720596 и rs424225505 соответственно. Полиморфизм в позиции 29188932 обнаружен впервые и не внесен в международные базы данных. Таким образом, в гене FRY имеются полиморфизмы, достоверно связанные с живой массой у овец, что позволяет использовать их в качестве молекулярных маркеров.

Ключевые слова: *овцы, Ovis aries, генотипирование, однонуклеотидный полиморфизм, мясная продуктивность, генотип*

Благодарности: работа выполнена при поддержке РНФ, № 25-16-20051 от 17.04.2025, https://rscf.ru/project/25-16-20051/ Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов*:* авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Соблюдение этических стандартов: эксперименты с животными проводили в соответствии с Руководством Национального института здравоохранения по уходу и использованию лабораторных животных (http://oacu.od.nih.gov/regs/index.htm). Протоколы исследований с использованием овец были одобрены методической комиссией Всероссийского научно-исследовательского института овцеводства и козоводства (ВНИИОК) – филиала ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр» (протокол № 2 от 29.03.2023). Все процедуры, связанные с генотипированием и отбором биоматериала, проводили с соблюдением принципов гуманного обращения с животными и минимизации стрессовых воздействий.

Для цитирования: Криворучко А. Ю., Скорых Л. Н., Криворучко О. Н., Каниболоцкая А. А., Яцык О. А., Кононова Л. В., Сафарян Е. Ю. Поиск полиморфизмов гена *FRY*, связанных с параметрами живой массы у баранов породы манычский меринос. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):435–447.
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.435-447

Поступила в редакцию: 28.05.2025
Доработана после рецензирования:28.10.2025
Принята к публикации: 08.04.2026
Опубликована онлайн: 27.04.2026

Search for polymorphisms of the *FRY* gene associated with live weight parameters in Manych Merino rams

© 2026. Alexander Yu. Krivoruchko[1, 2], Larisa N. Skorykh[1, 2], Olga N. Krivoruchko[1], Anastasia A. Kanibolotskaya[1] ✉, Olesya A. Yatsyk[1], Lidia V. Kononova[1], Elena Yu. Safaryan[1, 2]

[1]North Caucasus Federal Agricultural Research Centre, Mikhailovsk, Stavropol region, Russian Federation,

[2]North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation

Application of modern methods of genetic testing allows to supplement traditional breeding with new ways of predicting economically useful qualities in animals. To improve the parameters of meat productivity in sheep of Russian breeding, the identification of markers in genes associated with the development of muscle tissue is used. One of the promising candidate genes identified in various studies by full genome association search is FRY, the product of which participates in the formation of the cytoskeleton. There has been carried out a full genome sequencing of DNA of Manych merino sheep, based on the results of which the structure of the FRY gene was studied. Several thousand different polymorphisms, mainly single nucleotide substitutions, were detected in the gene structure. The study of the relationship of individual polymorphisms with the parameters of live weight in Manych merinos allowed to describe 46 loci that showed the greatest differences between carriers of different alleles for the studied parameter. Based on the analysis of the results, there were identified three polymorphisms in positions 29188932, 29071055 and 29219339 on chromosome 10, the difference between the carriers of allelic variants of which had the greatest value. Carriers of the mutant allele for the 29188932 polymorphism had an average live weight higher by 26 %, homozygotes for the substitution in the 29071055 position were 8.54 kg (18 %) higher than the other animals. The rams with mutant homozygous genotype at position 29219339 were superior to the rest by 12.07 kg, which is 25 %. All three polymorphisms – 29188932, 29071055 and 29219339 are the single nucleotide substitutions. The substitutions at 29071055 and 29219339 have been previously described in sheep and have nomenclature numbers rs413720596 and rs424225505, respectively. The polymorphism at position 29188932 was detected for the first time and was not listed in international databases. Thus, there are polymorphisms in the FRY gene that are reliably associated with live weight in sheep, which makes it possible to use them as molecular markers.

Keywords: *sheep, Ovis aries, genotyping, single nucleotide polymorphism, meat productivity, genotype*

Acknowledgments: the work was supported by the Russian Science Foundation, No. 25-16-20051 dated 17.04.2025, https://rscf.ru/project/25-16-20051/

The authors thanks the reviewers for their contributions to the peer review of this work.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Compliance with ethical standards: Animal experiments were conducted in accordance with the Guide of the National Institute of Health for the Care and Use of Laboratory Animals (http://oacu.od.nih.gov/regs/index.htm). The protocols of studies involving sheep were approved by the Methodological Committee of the All-Russian Research Institute of Sheep and Goat Breeding (VNIIOK), a branch of the North Caucasus Federal Agricultural Research Centre (Protocol No. 2 of March 29, 2023). All procedures related to genotyping and biomaterial collection were conducted in compliance with the principles of humane animal handling and stress minimization.

For citation: Krivoruchko A. Yu., Skorykh L. N., Krivoruchko O. N., Kanibolotskaya A. A., Yatsyk O. A., Kononova L. V., Safaryan E. Yu. Search for polymorphisms of the *FRY* gene associated with live weight parameters in Manych Merino rams. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):435–447. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.435-447

Received: 28.05.2025 Accepted for publication: 08.04.2026
Revised: 28.10.2025 Published online: 27.04.2026

Несмотря на большие успехи, достигнутые селекционерами в создании новых пород скота, животноводство постоянно сталкивается с растущими потребностями рынка в качественной баранине и говядине. Решить эту проблему с использованием только методов традиционной селекции уже не представляется возможным. Необходимо более широкое применение методов геномной и маркер-ассоциированной селекции. Как показала практика использования этих технологий, можно за короткий срок добиться существенного повышения продуктивности, используя в разведении носителей положительных генотипов. Это стало возможным благодаря полученной информации о влиянии различных генов на экстерьер и хозяйственно ценные признаки у животных [1].

Среди генов, связь которых с развитием мышечной ткани уже доказана, можно выделить ген гормона роста [2], миостатина [3], мутацию Каллипиги [4] и *MyOD1* [5]. Селекция по ним дает хороший результат, но у некоторых пород за счет проведенного отбора или особенностей геномов встречаются только положительные гомозиготные генотипы, что не позволяет использовать их для дальнейшего улучшения качеств животных [6]. Таким образом, требуется поиск новых генов, влияние которых на мясную

продуктивность можно будет применять в селекционной работе с российскими породами овец.

Использование полногеномного поиска ассоциаций для выявления новых генов-кандидатов позволило обнаружить ряд локусов генома у овец, достоверно связанных с прижизненными параметрами мясной продуктивности. Один из них – ген *FRY*, рядом с которым находились четыре однонуклеотидных полиморфизма rs408317317, rs427646265, rs420098635 и rs398157763, показавшие достоверную ассоциацию с живой массой [7]. Этот ген кодирует крупный протеин массой 330 кДа, связанный с микротрубочками цитоскелета. Он является одним из консервативных белков, участвующим в клеточных процессах большинства животных организмов, в том числе одноклеточных. Белок FRY выполняет также важнейшие функции в процессе деления клеток в составе протеинов, организующих веретено деления и процесс расхождения хромосом в митозе [8].

Связь гена *FRY* с хозяйственно ценными признаками обнаружена у овец еще в нескольких исследованиях, проведенных по всему миру. В работах на эфиопских породах овец по изучению связи локусов генома с локализацией подкожного жира и особенностями адаптации к климату ген *FRY* вошел в число предполагаемых генов-кандидатов [9]. Изучение породных особенностей овец суффолк и рамбулье на полногеномном уровне выявило связь с ними двух однонуклеотидных полиморфизмов на хромосоме 10 в локусе гена *FRY*. Учеными было высказано мнение о связи этого гена с размерами тела и шерстной продуктивностью, различными у изучаемых пород [10]. В достаточно крупном исследовании по поиску геномных ассоциаций с целым рядом продуктивных признаков у овец и факторов, на них влияющих (например, особенностями пищевого поведения и физиологической активностью), предложено несколько генов-кандидатов, среди которых фигурировал и ген *FRY* [11].

Проведенное в Иране большое исследование для полногеномного поиска ассоциаций со способностями овец к адаптации и проявлению продуктивных качеств в разных климатических условиях обнаружило несколько перспективных генов-кандидатов. Один из выявленных авторами локусов количественных признаков мясной продуктивности, такими как масса туши и мышц, выход баранины, процент жира и другими, находился на хромосоме 10 между генами *RXFP2* и *FRY* [12]. Поиск подписей селекции, то есть локусов, ассоциированных с особенностями пород катадин, рамбулье и дорпер, выявил несколько генов-кандидатов, возможно, влияющих на параметры, различающие между собой изучаемые породы. Ген-кандидат *FRY* оказался в одном из локусов генома, отличном по строению у овец рамбулье, что указывает на необходимость дальнейшего изучения его структуры и влияния на продуктивные качества [13].

Выявление подписей селекции, использованное для обнаружения локусов генома, ассоциированных с обменом микроэлементов у овец, также определило в качестве перспективных генов-кандидатов *FRY* и *RXFP2* [14]. В работах на мышах с нокаутом гена показано, что от экспрессии гена *FRY* зависела масса тела животных, причем эффект более заметен у самцов [15].

Таким образом, достаточно много исследований указывают на большое значение гена *FRY* в обеспечении нормальных процессов роста и развития животных, что диктует необходимость более пристального изучения его структуры у овец для определения перспектив использования в селекционной работе.

Цель исследования – изучить связи аллельных вариантов однонуклеотидных полиморфизмов (*Single Nucleotide Polymorphism*, SNP) гена *FRY* с параметрами живой массы у баранов породы манычский меринос с использованием данных полногеномного секвенирования нового поколения.

Научная новизна – впервые для овец породы манычский меринос методом полногеномного секвенирования проведено комплексное исследование структуры гена *FRY* и выявлены ассоциированные с живой массой полиморфизмы. Обнаружено и охарактеризовано 14 ранее не описанных полиморфизмов в гене *FRY* и не внесённых в международные базы данных. Идентифицированы три ключевых однонуклеотидных полиморфизма (в позициях 29188932, 29071055 и 29219339), показавших наибольшее влияние на живую массу животных. Полиморфизм 29188932 выявлен впервые и ассоциирован с увеличением живой массы на 26 % у носителей мутантного аллеля. Установлено, что большинство значимых полиморфизмов локализованы в интронных регионах гена, что указывает на их потенциальное влияние на регуляцию сплайсинга, а не на первичную структуру белка. Впервые для российской селекционной практики предложен набор конкретных молекулярных маркеров в гене *FRY* для маркер-ассоциированной селекции овец манычский меринос с целью повышения мясной продуктивности.

Материал и методы. Работы по изучению генетического материала выполнены во Всероссийском научно-исследовательском институте овцеводства и козоводства – филиал ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр» и Геномном центре Северо-Кавказского федерального университета.

Для исследования выбраны 30 баранов породы манычский меринос в возрасте девяти месяцев из СПК им. Ленина Апанасенковского района Ставропольского края. Особи для изучения отобраны путем случайной выборки, все животные прошли необходимые ветеринарные обработки и получали смешанный рацион.

Пробы крови для извлечения ДНК отбирали путем пункции яремной вены с соблюдением правил асептики. Образцы крови собирали в пробирки Vacutainer® со стабилизатором ЭДТА (Becton Dickinson International, США). Для выделения ДНК использовали 0,1 мл крови согласно инструкции к набору для экстракции нуклеиновых кислот «МагноПрайм ВЕТ» (НекстБио, Россия). Количество ДНК в растворе оценивали с использованием флуориметра «Qubit 4.0» (Invitrogen/Life Technologies, США). Качество выделенной ДНК определяли по соотношению OD (Optical Density) 260/280 нм на спектрофотометре NanoDrop OneC (Thermo-Fisher Scientific, Inc., США).

Секвенирование образцов геномной ДНК выполняли на высокопроизводительной платформе NovaSeq 6000 (Illumina, Inc., США). Средний размер прочтений составил 153 нуклеотида при средней глубине покрытия 54. Первичные данные обработаны для удаления маркерных последовательностей, сборку генома проводили с использованием референса вида Ovis aries – сборка ARS-UI_Ramb_v2.0 из базы NCBI (National Center for Biotechnology Information). В результате получен список полиморфизмов, отличающих геномы образцов от референсной сборки. Обнаруженные однонуклеотидные полиморфизмы описаны в соответствии с номенклатурой HGVS (Human Genome Variation Society). Из общего файла с результатами секвенирования извлекали данные о наличии полиморфизмов в области гена *FRY* на 10 хромосоме и фланкирующие его участки размером по 500 пар нуклеотидов. Сортировку и анализ выбранных данных, а также статистическую обработку с использованием t-критерия Стьюдента проводили в Excel для Windows (Microsoft, США). Достоверными считали различия при $p<0,05$.

Результаты и их обсуждение. Проведенное по результатам полногеномного секвенирования изучение структуры гена *FRY* у овец породы манычский меринос показало наличие достаточно большого количества встречающихся полиморфизмов различного вида. Выявлены однонуклеотидные замены, делеции и инсерции, в том числе отличающиеся по длине в одной и той же позиции в хромосоме. Всего обнаружено более 4800 структурных особенностей с различной частотой встречающихся в изученных образцах ДНК. Из числа полиморфизмов, используемых для дальнейших исследований, исключены имеющие частоту встречаемости менее чем у 4 особей (13 %) в изучаемой выборке из 30 животных. Далее проводили анализ различий по массе тела между группами референсных гомозигот и совокупной группой из гетерозигот и мутантных гомозигот, исходя из гипотезы, что мутантный аллель может присутствовать в доминантном варианте гена. В результате достоверные различия при $p<0,05$ показали 214 локусов.

Из числа полиморфизмов, показавших достоверные различия по массе тела среди представителей разных генотипов, отобраны особи, которые максимально различались по среднему значению изучаемого признака как в большую, так и в меньшую сторону (табл. 1). Всего отобрано 30 полиморфизмов. Среди них наибольшие значения достоверности различий ($p<0,000001$) показала замена в позиции 29154660. Низкий коэффициент вариации (3,31 %) выявлен для референсных гомозигот по замене в точке 29188932. Наибольшее значение коэффициента вариаций зафиксировано в размере 18,86 % также для референсных гомозигот, но в позиции 29047059. Для носителей большинства изученных полиморфизмов коэффициент вариации живой массы находился в пределах 14–17 %. Средняя масса тела среди референсных гомозигот была максимальной (55,59 кг) у носителей полиморфизма в позиции 29228531. Минимальный показатель средней массы тела в этой группе отмечали у животных с полиморфизмом в точке 29188932 – 41,65 кг. Это сочеталось с наименьшим в исследовании коэффициентом вариации массы тела между животными в группе. Среди носителей мутантного аллеля максимальная средняя масса 55,16 кг обнаружена у имеющих замену в позиции 29203675. Наименьшая средняя масса у животных с этим вариантом аллеля, 45,96 кг, выявлена по замене в точке 29224716. Максимальная разница по средней массе тела 10,96 кг (или 26 %) установлена у животных, различающихся по носи-

тельству референсного аллеля в гомозиготной форме с имеющими в геноме мутантный аллель в позиции 29188932. Масса тела отмечена больше у группы гетерозигот и мутантных гомозигот. Наименьшая разница в массе тела 4,22 кг выявлена среди особей, различающихся по генотипу в позиции 29357350. В этом случае средняя масса тела увеличилась у носителей исключительно дикого аллеля в гомозиготном варианте. Особый интерес также представляют носители разных генотипов по позиции 29071055, разница в живой массе которых составила 8,54 кг, преобладая у имеющих только дикие аллели, тогда как в большинстве случаев масса была выше у имеющих в геноме мутантный аллель (гетерозиготы и мутантные гомозиготы).

Таблица 1 – **Показатели массы тела у баранов породы манычский меринос с референсным гомозиготным генотипом (РГ) и имеющими мутантный аллель по исследуемым полиморфизмам (ГГ + МГ), кг /**
Table 1 – **Body weight indices in rams of Manych merino breed with reference homozygous genotype (RG) and having mutant allele for the polymorphisms under study (RG + MG), kg**

Позиция на хромосоме / Position on the chromosome	*РГ / RG,* M±m	*Cv, %*	*ГГ + МГ / RG + MG,* M±m	*Cv, %*	*Разница массы тела / Weight difference body*	*p-value*
29040652	53,04±2,27	13,54	48,32±2,08	18,29	-4,73	0,00472**
29040877	55,20±2,55	13,05	47,84±1,82	16,98	-7,36	0,00472**
29047059	46,66±2,65	18,86	52,31±1,86	14,63	5,65	0,02612*
29047676	53,31±2,63	17,09	47,56±1,81	15,20	-5,76	0,00001**
29056772	55,01±2,81	15,32	47,57±1,72	15,77	-7,44	0,03708*
29071055	55,46±2,57	14,67	46,92±1,67	15,12	-8,54	0,01383*
29072396	55,01±2,81	15,32	47,57±1,72	15,77	-7,44	0,03708*
29102246	51,78±1,95	16,81	46,02±2,35	14,42	-5,75	0,04188*
29154660	52,91±1,99	15,03	46,31±2,27	17,00	-6,60	0,000001**
29178145	51,76±1,94	16,33	46,62±2,59	16,67	-5,14	0,02519*
29188932	41,65±0,56	3,31	52,61±1,71	15,28	10,96	0,01042*
29201375	48,24±1,87	17,73	55,03±2,35	11,29	6,78	0,04027*
29201398	48,63±1,91	17,60	53,36±2,71	14,37	4,72	0,04027*
29203675	48,50±1,81	17,53	55,16±2,63	11,67	6,66	0,04027*
29224716	53,18±1,96	14,76	45,96±2,22	16,70	-7,22	0,00488**
29228531	55,59±3,55	16,87	48,04±1,60	15,24	-7,55	0,04664*
29270141	52,59±2,25	16,54	47,15±2,07	15,80	-5,44	0,03265*
29270706	52,70±2,59	17,69	47,74±1,84	14,94	-4,96	0,03265*
29270762	52,70±2,59	17,69	47,74±1,84	14,94	-4,96	0,03265*
29353460	51,65±2,07	17,00	47,28±2,36	15,78	-4,37	0,01176*
29353737	51,65±2,07	17,00	47,28±2,36	15,78	-4,37	0,01176*
29353952	52,16±2,36	16,92	47,94±2,09	16,28	-4,22	0,00004**
29355063	52,11±1,98	16,14	46,49±2,41	16,42	-5,63	0,00005**
29356967	52,13±2,13	16,83	46,93±2,18	15,38	-5,21	0,01176*
29357350	52,16±2,36	16,92	47,94±2,09	16,28	-4,22	0,00004**
29357520	52,13±2,13	16,83	46,93±2,18	15,38	-5,21	0,01176*
29357834	52,13±2,13	16,83	46,93±2,18	15,38	-5,21	0,01176*
29357876	52,13±2,13	16,83	46,93±2,18	15,38	-5,21	0,01176*
29357970	52,13±2,13	16,83	46,93±2,18	15,38	-5,21	0,01176*
29358679	52,59±2,25	16,54	47,15±2,07	15,80	-5,44	0,00004**

Примечание: РГ – гомозиготный генотип по референсному аллелю; ГГ – гетерозиготный генотип; МГ – гомозиготный генотип по мутантному аллелю. Достоверность (p-value) указана для различий по средней живой массе между группой гомозигот по референсному аллелю (РГ) и группой животных, несущих мутантный аллель (ГГ + МГ): * $p<0,05$; ** $p<0,01$ /

Note: RG – homozygous genotype for the reference allele; HG – heterozygous genotype; MG – homozygous genotype for the mutant allele. The significance (p-value) is indicated for the differences in average live weight between the group of homozygotes for the reference allele (RG) and the group of animals carrying the mutant allele (GG + MG): * $p<0.05$; ** $p<0.01$

Для выявления влияния генотипа по полиморфизмам гена *FRY* на массу тела баранов породы манычский меринос в случае, если референсный аллель находится в доминантном варианте гена, проведен анализ различий по массе тела между группами мутантных гомозигот и совокупной группой из гетерозигот и референсных гомозигот (носители предположительно доминантного аллеля). В результате достоверные различия (p<0,05) показали 214 локусов в составе гена *FRY* и фланкирующих его областей.

Среди выявленных локусов два относились к синонимичным заменам, 50 локусов представлены инсерциями и делециями, 14 полиморфизмов расположены в upstream, а 12 локализованы в downstream регионе. Остальные 186 полиморфизмов относились к интронным вариантам. Из них для дальнейшего анализа отобраны те, которые соответствовали двум основным критериям – наибольшая абсолютная разница по средней массе тела (как в большую, так и в меньшую сторону) и наличие не менее 4 носителей в любой из сравниваемых групп. В результате отобрано 16 полиморфизмов (табл. 2). Минимальную вариабельность по живой массе (всего 3,61 %) показали животные, имеющие в геноме мутантный гомозиготный генотип по замене в позиции 29192524. Самый высокий коэффициент вариации 17,01 % отмечен у животных с наличием референсного аллеля в генотипе по замене в точке 29211280.

Таблица 2 – **Показатели массы тела у баранов породы манычский меринос с мутантным гомозиготным генотипом (МГ) и носителями референсного аллеля (РГ + ГГ) по исследуемым полиморфизмам, кг /**
Table 2 – **Body weight indicators in Manych Merino rams with a mutant homozygous genotype (MG) and carriers of the reference allele (RG + GG) for the studied polymorphisms, kg**

Позиция на хромосоме / Position on the chromosome	*МГ / MG,* M±m	*Cv, %*	*РГ + ГГ / RG + MG,* M±m	*Cv, %*	*Разница массы тела / Weight difference body*	*p-value*
29039979	42,92±1,64	8,53	51,83±1,75	16,23	8,91	0,00089**
29044849	42,92±1,64	8,53	51,83±1,75	16,23	8,91	0,00089**
29045068	42,90±2,05	9,54	51,48±1,72	16,36	8,58	0,00472**
29071055	44,39±2,33	13,87	52,11±1,82	16,01	7,72	0,01383*
29108107	54,96±3,07	16,74	47,60±1,63	14,89	-7,36	0,04253*
29168628	42,58±1,67	8,80	51,92±1,73	16,00	9,34	0,00064**
29171217	45,17±2,27	15,88	52,88±1,88	15,11	7,70	0,01228*
29188706	54,96±2,32	13,36	47,21±1,86	16,70	-7,75	0,01267*
29188854	55,23±2,84	14,53	47,83±1,74	16,31	-7,39	0,03425*
29188932	55,70±2,57	13,85	47,22±1,71	15,83	-8,48	0,01042*
29192524	41,74±0,87	3,61	51,33±1,67	16,31	9,59	0,00001**
29195283	58,59±2,85	9,73	48,34±1,62	16,40	-10,25	0,01009*
29202323	54,66±2,76	15,12	47,74±1,78	16,24	-6,92	0,04136*
29203721	54,66±2,76	15,12	47,74±1,78	16,24	-6,92	0,04136*
29211280	56,03±2,74	11,97	48,23±1,75	17,01	-7,80	0,02547*
29219339	60,11±2,77	9,23	48,04±1,53	15,59	-12,07	0,00385**

Примечание: РГ – гомозиготный генотип по референсному аллелю; ГГ – гетерозиготный генотип; МГ – гомозиготный генотип по мутантному аллелю. Достоверность указана для различий средней живой массы между группой мутантных гомозигот (МГ) и группой носителей референсного аллеля (РГ + ГГ): * p<0,05; ** p<0,01 /

Note: RG – homozygous genotype for the reference allele; HG – heterozygous genotype; MG – homozygous genotype for the mutant allele. The reliability is indicated for the differences in average live weight between the group of mutant homozygotes (MG) and the group of carriers of the reference allele (RG + GG): * p<0.05; ** p<0.01.

Наибольший показатель достоверности различий (p<0,00001) по средней живой массе между носителями изучаемых генотипов (референсных гомозигот и носителей мутантного аллеля в любом виде) выявлен для замены в позиции 29192524. Наибольшая разница по массе тела с преобладанием в группе носителей мутантных гомозиготных генотипов зафиксирована в размере 12,07 кг (25 %) у имеющих полиморфизмы в позиции 29219339. У носителей мутантного гомозиготного генотипа по замене в этой точке (29219339) также

зафиксирована максимальная средняя масса тела 60,11 кг среди групп изучаемых животных. Минимальная средняя масса среди мутантных гомозигот (41,74 кг) обнаружена в группе животных, имеющих замену в позиции 29192524. У манычских мериносов, имеющих в генотипах по исследуемым полиморфизмам референсный аллель, максимальная масса тела составила 52,88 кг, которая обнаружена у носителей полиморфизма в позиции 29171217. Минимум средней массы тела в этой группе вариантов генотипов (47,21 кг) выявлен у носителей полиморфизмов в точке 29188706.

Бóльшая часть обнаруженных полиморфизмов, имеющих достоверную связь с живой массой у баранов породы манычский меринос, при сравнении носителей чисто референсного генотипа и имеющих в наличии хотя бы один мутантный аллель, ранее выявлена у других пород овец и внесена в международную базу данных. Расположение и характеристика этих полиморфизмов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – **Характеристика полиморфизмов, ассоциированных с разницей в массе тела у манычских мериносов при сравнении носителей референсного гомозиготного генотипа (РГ) и имеющими мутантный аллель по исследуемым полиморфизмам (ГГ + МГ) /**
Table 3 – **Characteristics of polymorphisms associated with differences in body weight in Manych merinos when comparing carriers of the reference homozygous genotype (RG) and those with a mutant allele for the polymorphisms under study (GG + MG)**

Позиция / Position	*Название / Name*	*Расположение в гене / Location*	*Аллель / Allele*	
			референсный / reference	*мутантный / mutant*
29040652	rs413488815	c.8826+1250A>C	*T*	*G*
29040877	rs402517549	c.8826+1025G>A	*C*	*T*
29047059	rs403455963	c.8494-1623C>T	*G*	*A*
29047676	rs421172443	c.8493+1017C>T	*G*	*A*
29056772	rs160505656	c.7774-2774C>T	*G*	*A*
29071055	rs413720596	c.7045-753G>A	*C*	*T*
29072396	rs405254336	splice_region c.6874-7A>G	*T*	*C*
29102246	rs419207589	c.4783-702T>A	*A*	*T*
29154660	rs603019216	c.2012-508T>C	*A*	*G*
29178145	Нет в базе / Not in the database	c.1246-200_1246-199insG	*acccccc*	*aCccccccc*
29188932		c.824+1562G>T	*A*	*C*
29201375	rs403431402	c.684+199A>G	*T*	*C*
29201398	rs416499425	c.684+176T>C	*A*	*G*
29203675	rs414218162	c.631-2048T>C	*A*	*G*
29224716	Нет в базе / Not in the database	c.630+5647_630+5648insG	*TCCCCCC*	*TCCCCCCC*
29228531		c.630+1839C>G	*C*	*G*
29270141	rs420021997	c.431-39572G>C	*C*	*G*
29270706	rs424583673	c.431-40137A>G	*T*	*C*
29270762	rs414873089	c.431-40193T>G	*A*	*C*
29353460	rs404511892	c.430+5785G>A	*C*	*T*
29353737	rs430198433	c.430+5508G>A	*C*	*T*
29353952	rs402566324	c.430+5293T>C	*A*	*G*
29355063	Нет в базе	c.430+4182G>A	*C*	*T*
29356967	rs161989759	c.430+2278T>C	*A*	*G*
29357350	rs430792415	c.430+1895A>G	*T*	*C*
29357520	rs161989762	c.430+1725A>G	*T*	*C*
29357834	rs399191345	c.430+1411T>C	*A*	*G*
29357876	rs412458455	c.430+1369A>G	*T*	*C*
29357970	Нет в базе / Not in the database	c.430+1273delT	*TAA*	*TA*
29358679	rs429507742	c.430+566T>C	*A*	*G*

Все обнаруженные структурные изменения в гене располагались в области интронов, при этом замена в позиции 29072396 находилась в подтвержденной области регуляции сплайсинга. Два полиморфизма в позициях 29178145 и 29224716 имели вид инсерций одного нуклеотида G и ранее не внесены в базу данных полиморфизмов. Также впервые обнаружены однонуклеотидные замены в позициях 29188932, 29228531, 29355063 и 29357970. В расположенных рядом с геном *FRY* 3' и 5' нетранслируемых областях, локусе промотера, а также прилегающих к гену зонах ДНК, ассоциированные с массой полиморфизмы не установлены.

Почти все выявленные полиморфизмы с достоверной связью с живой массой у баранов породы манычский меринос, при сравнении носителей мутантного генотипа и имеющих в наличии хотя бы один референсный аллель, ранее описаны у других пород овец. Расположение и характеристика этих полиморфизмов приведены в таблице 4. Все обнаруженные структурные изменения в гене располагались в области интронов, при этом в позициях 29045068 и 29192524 выявлены инсерции, а остальные варианты полиморфизмов относились к однонуклеотидным заменам. Эти две инсерции, а также замены в позициях 29108107, 29171217, 29188706, 29188854, 29188932 и 29203721 не внесены в международные базы данных и выявлены нами у овец впервые. В расположенных рядом с геном *FRY* 3' и 5' нетранслируемых областях, локусе промотера, а также прилегающих к гену зонах ДНК, ассоциированные с живой массой у животных, различающихся по носительству референсного аллеля, полиморфизмы, не обнаружены.

Таблица 4 – **Характеристика полиморфизмов, ассоциированных с разницей в массе тела у манычских мериносов при сравнении носителей мутантного гомозиготного генотипа и имеющими в геноме референсный аллель (МГ против ГГ + РГ) /**
Table 4 – **Characterization of polymorphisms associated with differences in body weight in Manych merinos when comparing carriers of the mutant homozygous genotype and those with the reference allele in the genome (MG vs. GG + RG)**

Позиция / Position	*Название / Name*	*Расположение в гене / Location*	*Аллель / Allele*	
			референсный / reference	*мутантный / mutant*
29039979	rs160505386	c.8826+1923A>G	*T*	*C*
29044849	rs425465855	c.8643+438A>G1	*T*	*C*
29045068	Нет в базе / Not in the database	c.8643+212_8643+213insC	*agggggg*	*aGgggggg*
29071055	rs413720596	c.7045-753G>A	*C*	*T*
29108107	Нет в базе / Not in the database	c.4378+1011C>T	*A*	*G*
29168628	rs412397904	c.1540-2400A>G	*T*	*C*
29171217	Нет в базе / Not in the database	c.1539+4288A>G	*C*	*T*
29188706	Нет в базе / Not in the database	c.824+1788A>T	*A*	*T*
29188854	Нет в базе / Not in the database	c.824+1640A>G	*C*	*T*
29188932	Нет в базе / Not in the database	c.824+1562G>T	*A*	*C*
29192524	Нет в базе / Not in the database	c.685-1907_685-1906insTAATCATA	*AATGATTATATGATTA*	*AATGATTATATGATTATATGATTA*
29195283	rs411856845	c.685-4650C>T	*G*	*A*
29202323	rs419025200	c.631-696G>A	*C*	*T*
29203721	Нет в базе / Not in the database	c.631-2094A>T	*A*	*T*
29211280	rs424240714	c.631-9653T>C	*A*	*G*
29219339	rs424225505	c.630+11031G>A	*C*	*T*

Для поиска новых молекулярно-генетических маркеров мясной продуктивности у овец российских пород впервые проведено исследование структуры гена *FRY* по данным полногеномного секвенирования. Объектом изучения служили бараны породы манычский меринос, перспективной в плане селекции для получения высококачественной баранины в промышленных масштабах. Изучалась связь наличия в геноме референсного и мутантного аллелей по всем обнаруженным в области гена *FRY* полиморфизмам с массой животных. В результате выявлено более 40 полиморфизмов, достоверно ассоциированных с изучаемым показателем, что позволяет рассматривать их как перспективные молекулярные маркеры для селекции.

Ген *FRY* (FRY microtubule binding protein) выбрали для изучения как потенциальный ген-кандидат на основании анализа результатов исследований по полногеномному поиску ассоциаций с признаками мясной продуктивности у овец. Проведенные нами ранее работы с использованием ДНК-чипов Illumina также подтвердили достоверную связь локуса генома, содержащего ген *FRY*, с параметрами живой массы у овец мериносовых пород [7]. Задачей настоящего исследования было выявление конкретных полиморфизмов в составе гена, которые могут быть связаны с ростом и развитием животных.

Для обнаружения полиморфизмов, ассоциированных с живой массой у манычских мериносов, использовали два варианта проведения исследований для каждого полиморфизма. В первом варианте, выборку животных разделили на две группы – носители только референсного аллеля (референсные гомозиготы) и вторая группа, имеющие в геноме оба варианта носительства мутантного аллеля, то есть гетерозиготы и мутантные гомозиготы. Во втором варианте первая группа состояла из носителей только мутантного аллеля (мутантные гомозиготы), а во вторую вошли имеющие любой вариант присутствия референсного аллеля – гетерозиготы и референсные гомозиготы. Такой подход обусловлен тем, что один из аллелей может быть связан с доминирующим вариантом гена и оказывать одинаковое влияние как в гомозиготном, так и гетерозиготном вариантах. Представленный способ использован последовательно для изучения каждого из 4800 обнаруженных в составе гена *FRY* полиморфизмов.

Полученные результаты подтвердили наши предположения о наличии в составе гена *FRY* полиморфизмов, ассоциированных с показателями живой массы у манычских мериносов. Несмотря на описанную в литературе высокую эволюционную консервативность гена от насекомых до высших млекопитающих [16], проведенное исследование показало наличие в его составе значительного количества полиморфизмов, причем многие из них имели достаточно высокую частоту встречаемости в популяции обследованных животных, что позволяет на основе их изучения проводить селекционный отбор.

Первый вариант проведения оценки связи мутантного аллеля в генотипах по изучаемым заменам позволил выявить 30 полиморфизмов, с достаточно выраженными различиями по показателям живой массы. Разница в среднем весе между выделяемыми по каждому полиморфизму группами животных составила от 4,22 до 10,96 кг, так как в процессе оценки влияния полиморфизмов мы отбирали те, для которых различия по средней живой массе между носителями разных аллельных вариантов были наиболее выражены. Большинство из них можно предложить в качестве молекулярных маркеров, так как генотипирование по выявленным заменам позволит прогнозировать живую массу отдельных особей. Но наибольший интерес представляют два полиморфизма – в позициях 29188932 и 29071055. Выявление хотя бы одной мутантной копии в точке 29188932 позволяет считать высокой вероятность того, что животное будет иметь повышенную живую массу по сравнению с другими особями в популяции. В нашем случае разница в среднем живом весе носителей мутантного аллеля до 26 %, что указывает на возможный уровень повышения мясной продуктивности при использовании в селекционном отборе именно такого варианта генотипа. При сравнении животных с мутантным гомозиготным генотипом по этому полиморфизму с имеющими в геноме референсный аллель (второй вариант изучения влияния полиморфизмов) также выявлена подобная закономерность. Мутантные гомозиготы превосходили другую группу животных с референсным аллелем в среднем на 8,48 кг, что составляет более 18 %. Таким образом, при закреплении в популяции гена *FRY* с мутантным гомозиготным генотипом по замене в позиции 29188932

животные будут иметь более высокую живую массу, а гомозиготность не позволит появляться потомству с референсным гомозиготным генотипом, отличающемуся низкими показателями живой массы.

Полиморфизм в позиции 29071055 имеет особенность в том, что носители его референсного гомозиготного генотипа, а не мутантного аллеля, превосходят других животных по живому весу в среднем на 8,54 кг, что составляет 18 %. Имеющие в геноме мутантный гомозиготный генотип по этому полиморфизму достоверно меньше остальных особей на 7,72 кг, или 15 %. Этот результат указывает на необходимость отбора для разведения исключительно особей с референсным гомозиготным генотипом по полиморфизму в точке 29071055 для повышения продуктивности и предотвращения расщепления при дальнейшем скрещивании.

Еще один полиморфизм в позиции 29219339 заслуживает особого внимания, так как носители мутантного гомозиготного генотипа по этому локусу имели максимальную разницу в живой массе по сравнению с животными, имеющими референсный аллель. Разница составила 12,07 кг, или 25 %.

Все три полиморфизма с наибольшим влиянием на живую массу у манычских мериносов 29188932, 29071055 и 29219339 имеют вид однонуклеотидных замен. При этом замены в точках 29071055 и 29219339 ранее описаны у овец и имеют номенклатурные номера rs413720596 и rs424225505 соответственно. Полиморфизм в позиции 29188932 обнаружен нами впервые и не внесен в международные базы данных.

Одним из наиболее изученных генов, влияющих на мясную продуктивность у животных, является ген миостатина. Тестирование его структуры уже достаточно широко используется в маркер-ассоциированной селекции для прогнозирования выхода мясной продукции. Наши исследования показали, что различия в живом весе манычских мериносов с разными генотипами по полиморфизмам гена *FRY* показывают даже бóльшую величину, чем у овец с разными генотипами по полиморфизмам гена миостатина, описанным Н. М. Осман с соавторами (N. M. Osman et al., 2021) [17]. Это подтверждает связь структурных особенностей гена *FRY* с показателями мясной продуктивности у овец и открывает перспективы использования генотипирования по выявленным нами полиморфизмам в селекционной работе.

Изучение функционального значения выявленных однонуклеотидных замен и других полиморфизмов показало, что они располагаются не в кодирующей белок последовательности нуклеотидов, а находятся между экзонами гена. Таким образом, при их наличии не образуется условий для грубых изменений в аминокислотной последовательности кодируемого протеина, таких как стоп-кодоны и сдвиги рамки считывания. Однако локализация полиморфизмов в области интронов также может оказывать влияние на функциональные свойства белка за счет изменения механизмов посттранскрипционной модификации матричной РНК в процессе сплайсинга. Причем один из обнаруженных полиморфизмов в позиции 29072396 как раз локализовался в области подтвержденного участка регуляции сплайсинга. Значение расположенных в интронах полиморфизмов для реализации продуктивных качеств у овец ранее подтверждено на примере изучения однонуклеотидных замен в гене миостатина. Выявлена достоверная связь подобных мутаций с показателями мясной продуктивности мериносовых овец европейской генерации [6]. Все это указывает на важность дальнейшего изучения механизмов влияния выявленных полиморфизмов в гене *FRY* на рост и развитие овец различных пород. При этом уже полученных данных об ассоциации полиморфизмов с продуктивными качествами вполне достаточно для использования их в качестве молекулярных маркеров при селекции для повышения выхода баранины.

Заключение. С использованием данных полногеномного секвенирования нами изучена структура гена *FRY* у овец породы манычский меринос, что позволило проанализировать 4800 полиморфизмов для оценки их связи с живой массой у исследуемых животных. Выявлены 214 полиморфизмов с достоверными различиями по изучаемому показателю между носителями референсного гомозиготного генотипа и животными, имеющими в составе генотипа мутантный аллель. Из них 30 полиморфизмов показали наибольшие различия в средней живой массе между группами животных – от 4,22 до 10,96 кг. Для 16 полиморфизмов установлено различие в живом весе у носителей референсного аллеля по сравнению с мутантными гомозиготами. При этом достоверное различие в средней массе

между группами животных составило от 6,92 до 12,07 кг. Бóльшая часть обнаруженных полиморфизмов локализовалась в интронах гена и представлена однонуклеотидными заменами. Среди выявленных полиморфизмов 14 описаны у овец впервые. Учитывая выраженную разницу в живой массе между носителями разных генотипов по выявленным однонуклеотидным полиморфизмам, необходимо проведение их дальнейшего изучения и возможного использования в качестве маркеров при селекционной работе для повышения мясной продуктивности овец.

References

1. Kostusiak P., Slósarz J., Gołębiewski M., Grodkowski G., Puppel K. Polymorphism of genes and their impact on beef quality. Current Issues in Molecular Biology. 2023;45(6):4749–4762. DOI: https://doi.org/10.3390/cimb45060302

2. Abdelmoneim T. S., Brooks P. H., Afifi M., Swelum A. A. A. Sequencing of growth hormone gene for detection of polymorphisms and their relationship with body weight in Harri sheep. Indian Journal of Animal Research. 2017;51(2):205–211. DOI: https://doi.org/10.18805/ijar.11457

3. Prihandini P. W., Hariyono D. N., Tribudi Y. A. Myostatin gene as a genetic marker for growth and carcass traits in beef cattle. Indonesian Bulletin of Animal Veterinary Sciences. 2021;31(1):37–42. DOI: https://doi.org/10.14334/wartazoa.v31i1.2530

4. Zhao K., Li X., Liu D., Wang L., Pei Q., Han B. et al. Genetic Variations of MSTN and Callipyge in Tibetan Sheep: Implications for Early Growth Traits. Genes (Basel). 2024;15(7):921. DOI: https://doi.org/10.3390/genes15070921

5. Sousa-Junior L. P. B., Meira A. N., Azevedo H. C., Muniz E. N., Coutinho L. L., Mourão G. B. et al. Variants in myostatin and MyoD family genes are associated with meat quality traits in Santa Inês sheep. Animal Biotechnology. 2022;33(2):201–213. DOI: https://doi.org/10.1080/10495398.2020.1781651

6. Grochowska E., Borys B., Mroczkowski S. Effects of intronic SNPs in the myostatin gene on growth and carcass traits in colored Polish merino sheep. Genes (Basel). 2020;11(1):2. DOI: https://doi.org/10.3390/genes11010002

7. Криворучко А. Ю., Яцык О. А., Сафарян Е. Ю. Гены-кандидаты продуктивности, выявленные при полногеномном поиске ассоциаций с показателями классности у овец породы российский мясной меринос. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2020;24(8):836–843. DOI: https://doi.org/10.18699/VJ20.681 EDN: EEQNNA

Krivoruchko A. Y., Yatsyk O. A., Safaryan E. Y. Candidate genes for productivityidentified by genome-wide association studywith indicators of class in the russian meat merino sheep breed. *Vavilovsky zhurnal genetiki i selektsii* = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2020;24(8):836–843. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.18699/VJ20.681

8. Nagai T., Mizuno K. Multifaceted roles of Furry proteins in invertebrates and vertebrates. The Journal of Biochemistry. 2014;155(3):137–146. DOI: https://doi.org/10.1093/jb/mvu001

9. Ahbara A., Bahbahani H., Almathen F., Al Abri M., Agoub M. O., Abeba A. et al. Genome-Wide Variation, Candidate Regions and Genes Associated With Fat Deposition and Tail Morphology in Ethiopian Indigenous Sheep. Frontiers in Genetics. 2018;9:699. DOI: https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00699

10. Zhang L., Mousel M. R., Wu X., Michal J. J., Zhou X., Ding B. et al. Genome-wide genetic diversity and differentially selected regions among Suffolk, Rambouillet, Columbia, Polypay, and Targhee sheep. PLoS ONE. 2013;8(6):e65942. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065942

11. Romaniuk E., Vera B., Peraza P., Ciappesoni G., Damián J. B., Lier E. V. Identification of Candidate Genes and Pathways Linked to the Temperament Trait in Sheep. Genes (Basel). 2024;15(2):229. DOI: https://doi.org/10.3390/genes15020229

12. Patiabadi Z., Razmkabir M., Esmailizadeh Koshkoiyeh A., Moradi M. H., Rashidi A., Mahmoudi P. et al. Whole-genome scan for selection signature associated with temperature adaptation in Iranian sheep breeds. PLoS ONE. 2024;19(8):e0309023. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0309023

13. Becker G. M., Thorne J. W., Burke J. M., Lewis R. M., Notter D. R., Morgan J. L. M. et al. Genetic diversity of United States Rambouillet, Katahdin and Dorper sheep. Genetics Selection Evolution. 2024;56:56. DOI: https://doi.org/10.1186/s12711-024-00905-7

14. Adeniyi O. O., Lenstra J. A., Mastrangelo S., Lühken G. Genome-wide comparative analyses for selection signatures indicate candidate genes for between-breed variability in copper accretion in sheep. Animal. 2024;18(10):101329. DOI: https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101329

15. Liu Y., Chen X., Gong Z., Zhang H., Fei F., Tang X. et al. Fry Is Required for Mammary Gland Development During Pregnant Periods and Affects the Morphology and Growth of Breast Cancer Cells. Frontiers in Oncology. 2019;9:1279. DOI: https://doi.org/10.3389/fonc.2019.01279

16. Ikeda M., Chiba S., Ohashi K., Mizuno K. Furry protein promotes aurora A-mediated Polo-like kinase 1 activation. Journal of Biological Chemistry. 2012;287(33):27670–27681.
DOI: https://doi.org/10.1074/jbc.M112.378968

17. Osman N. M., Shafey H. I., Abdelhafez M. A., Sallam A. M., Mahrous K. F. Genetic variations in the Myostatin gene affecting growth traits in sheep. Veterinary World. 2021;14(2):475–482.
DOI: https://doi.org/10.14202/vetworld.2021.475-482

Вклад авторов: Криворучко А. Ю. – концепция и план исследования, анализ данных, подготовка рукописи; Скорых Л. Н. – концепция и анализ данных; Криворучко О. Н. – анализ данных; Каниболоцкая А. А. – анализ данных, подготовка рукописи; Яцык О. А. – концепция и план исследования. Кононова Л. В., Сафарян Е. Ю. – концепция и план исследования, анализ данных.

Сведения об авторах

Криворучко Александр Юрьевич, доктор биол. наук, главный научный сотрудник лаборатории геномной селекции и репродуктивной криобиологии в животноводстве, Всероссийский научно-исследовательский институт овцеводства и козоводства – филиал ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», д. 15, пер. Зоотехнический, г. Ставрополь, Российская Федерация, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center; профессор базовой кафедры генетики и селекции медико-биологического факультета ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», ул. Пушкина, д. 1, г. Ставрополь, Российская Федерация, 355017, e-mail: info@ncfu.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4536-1814**

Скорых Лариса Николаевна, доктор биол. наук, главный научный сотрудник лаборатории геномной селекции и репродуктивной криобиологии в животноводстве, Всероссийский научно-исследовательский институт овцеводства и козоводства – филиал ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», д. 15, пер. Зоотехнический, г. Ставрополь, Российская Федерация, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center; профессор базовой кафедры генетики и селекции медико-биологического факультета ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», ул. Пушкина, д. 1, г. Ставрополь, Российская Федерация, 355017, e-mail: info@ncfu.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6090-4453**

Криворучко Ольга Николаевна, аспирант, Всероссийский научно-исследовательский институт овцеводства и козоводства – филиал ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», д. 15, пер. Зоотехнический, г. Ставрополь, Российская Федерация, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4737-2982**

✉ **Каниболоцкая Анастасия Александровна**, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории геномной селекции и репродуктивной криобиологии в животноводстве, Всероссийский научно-исследовательский институт овцеводства и козоводства – филиал ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», д. 15, пер. Зоотехнический, г. Ставрополь, Российская Федерация, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3003-4175**, e-mail: dorohin.2012@inbox.ru

Яцык Олеся Андреевна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории геномной селекции и репродуктивной криобиологии в животноводстве, Всероссийский научно-исследовательский институт овцеводства и козоводства – филиал ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», д. 15, пер. Зоотехнический, г. Ставрополь, Российская Федерация, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2730-2482**

Кононова Лидия Валентиновна, кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории разведения и селекции сельскохозяйственных животных, Всероссийский научно-исследовательский институт овцеводства и козоводства – филиал ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», д. 15, пер. Зоотехнический, г. Ставрополь, Российская Федерация, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3812-9099**

Сафарян Елена Юрьевна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории геномной селекции и репродуктивной криобиологии в животноводстве, Всероссийский научно-исследовательский институт овцеводства и козоводства – филиал ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр», д. 15, пер. Зоотехнический, г. Ставрополь, Российская Федерация, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center; доцент базовой кафедры генетики и селекции медико-биологического факультета ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», ул. Пушкина, д. 1, г. Ставрополь, Российская Федерация, 355017, e-mail: info@ncfu.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2049-842X**

Author contributions: Krivoruchko A. Yu. – research concept and plan, data analysis, manuscript preparation; Skorykh L. N. – data concept and analysis; Krivoruchko O. N. – data analysis; Kanibolotskaya A. A. – data analysis, manuscript preparation; Yatsyk O. A. – research concept and plan; Kononova L. V., Safaryan E. Yu. – research concept and plan, data analysis.

Information about the authors

Alexander Yu. Krivoruchko, DSc in Biology, chief researcher, the Laboratory of Genomic Breeding and Reproductive Cryobiology in Animal Husbandry, VNIIOK – branch North Caucasus Federal Agricultural Research Centre, 15 Zootekhnichesky Lane, Stavropol, Russian Federation, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center; professor at the Department of Genetics and Breeding, Faculty of Medicine and Biology, North-Caucasus Federal University, Pushkin St., 1, Stavropol, Russian Federation, 355017, e-mail: info@ncfu.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4536-1814**

Larisa N. Skorykh, DSc in Biology, chief researcher, the Laboratory of Genomic Breeding and Reproductive Cryobiology in Animal Husbandry, VNIIOK – branch North Caucasus Federal Agricultural Research Centre, 15 Zootekhnichesky Lane, Stavropol, Russian Federation, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center; professor at the Department of Genetics and Breeding, Faculty of Medicine and Biology, North-Caucasus Federal University, Pushkin St., 1, Stavropol, Russian Federation, 355017, e-mail: info@ncfu.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6090-4453

Olga N. Krivoruchko, graduate student, VNIIOK – branch North Caucasus Federal Agricultural Research Centre, 15 Zootekhnichesky Lane, Stavropol, Russian Federation, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4737-2982

✉ **Anastasia A. Kanibolotskaya**, PhD in Biology, senior researcher, the Laboratory of Genomic Breeding and Reproductive Cryobiology in Animal Husbandry, VNIIOK – branch North Caucasus Federal Agricultural Research Centre, 15 Zootekhnichesky Lane, Stavropol, Russian Federation, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3003-4175, e-mail: dorohin.2012@inbox.ru

Olesya A. Yatsyk, PhD in Biology, senior researcher, the Laboratory of Genomic Breeding and Reproductive Cryobiology in Animal Husbandry, VNIIOK – branch North Caucasus Federal Agricultural Research Centre, 15 Zootekhnichesky Lane, Stavropol, Russian Federation, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2730-2482

Lidia V. Kononova, PhD in Agricultural Science, leading researcher, the Laboratory of Breeding and Selection of Farm Animals, VNIIOK – branch North Caucasus Federal Agricultural Research Centre, 15 Zootekhnichesky Lane, Stavropol, Russian Federation, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3812-9099**

Elena Yu. Safaryan, PhD in Biology, senior researcher, the Laboratory of Genomic Breeding and Reproductive Cryobiology in Animal Husbandry, VNIIOK – branch North Caucasus Federal Agricultural Research Centre, 15 Zootekhnichesky Lane, Stavropol, Russian Federation, 355017, e-mail: vniiok@fnac.center; associate professor at the Department of Genetics and Breeding, Faculty of Medicine and Biology, North-Caucasus Federal University, Pushkin St., 1, Stavropol, Russian Federation, 355017, e-mail: info@ncfu.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2049-842X

✉ – Для контактов / Corresponding author

ВЕТЕРИНАРНАЯ МЕДИЦИНА/VETERINARY MEDICINE

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.448–456
УДК 619:616:636.4

(cc) BY

Патоморфологические особенности изменений миокарда у поросят при промышленном содержании

© 2026. И. М. Петрова, М. В. Бытов ✉, С. Л. Хацко, Л. И. Дроздова, И. А. Шкуратова

ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Екатеринбург, Российская Федерация

У свиней, как и других сельскохозяйственных животных, здоровье сердечной мышцы является важнейшим фактором, определяющим состояние организма, а значит, играет существенную роль в повышении качества продукции. Перевод свиноводства на промышленную основу обуславливает развитие структурно-функциональных изменений в сердечной мышце поросят, которые могут проявиться уже в раннем онтогенезе. Несмотря на достаточно подробное освещение проблемы патологии сердца у сельскохозяйственных животных, в литературе представлено не так много данных об особенностях морфологического изменения миокарда, выявленных с помощью комплекса разных гистохимических методов. Цель данного исследования – изучение патоморфологических изменений миокарда у поросят с использованием гистохимических методов. Для достижения поставленной цели исследован постмортальный материал, отобранный от поросят возраста 1-2 месяцев (n = 3), 3 месяцев (n = 6), 4,5–5,0 месяцев (n = 4). Для морфологического исследования использованы разные гистологические методы окрашивания препаратов: гематоксилином и эозином, по Маллори и ГОФП. Проведено иммуногистохимическое окрашивание с антителами к IL-6. Гистологическое исследование миокарда у поросят в возрасте 1-2 месяцев выявило очаги поврежденной мышечной ткани, характерные для миокардита. Наряду с этим обнаружена положительная реакция кардиомиоцитов на IL-6, предположительно ассоциируемая нами с защитой мышечной ткани. У поросят в возрасте 3 месяцев деструктивные процессы выражены в большей степени, и коррелируют с увеличением площади, занимаемой поврежденными кардиомиоцитами. У поросят в возрасте 4,5–5,0 месяцев, вероятно, ввиду активации компенсаторных механизмов, воспалительные процессы выражены в меньшей степени, а кроме того, обнаруживаются очаги миогенеза. Полученные данные обосновывают дальнейшие исследования, связанные с более подробным уточнением механизмов деструктивных процессов миокарда в возрастном аспекте.

Ключевые слова: *ГОФП, иммуногистохимия, IL-6, морфологические изменения*

Благодарность: исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-16-00117 «Пространственная характеристика транскриптомных и метаболомных особенностей преждевременной структурно-функциональной дегенерации тканей органов сельскохозяйственных животных и птицы», https://rscf.ru/project/23-16-00117

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Петрова И. М., Бытов М. В., Хацко С. Л., Дроздова Л. И., Шкуратова И. А. Патоморфологические особенности изменений миокарда у поросят при промышленном содержании. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):448–456. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.448-456

Поступила в редакцию: 14.07.2025 Принята к публикации: 17.04.2026
Доработана после рецензирования: 25.09.2025 Опубликована онлайн: 27.04.2026

Pathomorphological features of myocardial changes in piglets under industrial housing conditions

© 2026. Irina M. Petrova, Maksim V. Bytov ✉, Sergey L. Khatsko, Lyudmila I. Drozdova, Irina A. Shkuratova

Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

In pigs, as in other farm animals, the health of cardiac muscle is the most important factor determining the general state of the organism, and therefore plays a significant role in improving the quality of the products. Due to industrialization of pig farming, structural and functional changes in cardiac muscle can occur in early ontogenesis. Despite the fairly detailed coverage of the problem of heart pathology in farm animals, the literature does not provide much data on the features of morphological changes in the myocardium identified using a complex of histochemical methods. The objective of the research is to study pathomorphological myocardial changes in piglets using histochemical methods. To achieve this objective, the material collected postmortem from piglets aged 1-2 months (n = 3), 3 months (n = 6), and 4.5-5.0 months (n = 4) was examined. Different

histological methods of preparation staining were used for the morphological examination: hematoxylin and eosin, Mallory and HBFP staining. Immunohistochemical staining with antibodies to IL-6 was performed. As a result of histological studies, areas of damaged muscle tissue attributed to myocarditis were detected in the myocardium of piglets aged 1-2 months. At the same time, a positive reaction of cardiomyocytes to IL-6 was detected, which was probably associated with the protection of muscle tissue. In piglets aged 3 months, destructive processes were expressed to a greater extent and they correlated with an increase in the area of damaged cardiomyocytes. In piglets aged 4.5-5.0 months, probably due to the activation of compensatory mechanisms, inflammatory processes were expressed to a lesser extent, and in addition, foci of myogenesis were detected. The data obtained justify further studies related to a more detailed clarification of the mechanisms of destructive processes of the myocardium in pigs of different age.

Keywords: *HBFP, immunohistochemistry, IL-6, morphological changes*

Acknowledgements: The research was supported by RSF (project No. 23-16-00117) “Spatial characterization of transcriptomic and metabolomic features of tissue aging processes in farm animals and poultry”. https://rscf.ru/project/23-16-00117.

The authors thank the reviewers for their contributions to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Petrova I.M., Bytov M.V., Khatsko S.L., Drozdova L.I., Shkuratova I.A. Pathomorphological features of myocardial changes in piglets under industrial housing conditions. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):448–456. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.448-456

Received: 14.07.2025
Revised: 10.09.2025
Accepted for publication: 17.04.2026
Published online: 27.04.2026

Здоровье сердечной мышцы является важнейшим фактором, определяющим состояние организма, а значит, играет существенную роль в повышении качества продукции. Адаптационные возможности сердечной мышцы с возрастом снижаются, что обусловлено структурно-функциональной дегенерацией органа: нарушениями работы проводящей системы сердца, склеротическими и другими изменениями.

В свою очередь, состояние других систем организма отражается на функционировании сердца. Известно, что расстройство обмена веществ, дисбаланс витаминов и микроэлементов приводят к функциональной недостаточности сердечно-сосудистой системы [1]. Нарушение работы поджелудочной железы ассоциировано с изменениями в сердечной мышце. Например, при картине острого панкреатита развиваются дистрофические процессы в миокарде, представленные фрагментацией и денуклеацией кардиомиоцитов, а также расстройства со стороны микроциркуляторного русла в виде артериоловенулярного застоя и кровоизлияний [2]. Хронические поражения печени также вызывают дистрофические изменения миокарда у свиней, проявляющиеся в виде деструкции митохондрий кардиомиоцитов, разобщённости миофибрилл, внутриклеточного отека и других нарушений [1].

Для сельскохозяйственных животных в связи с требованиями производства и особенностями содержания характерно более раннее развитие в онтогенезе структурно-функциональных дегенеративных изменений. Известно, что у поросят часто встречаются врожденные пороки органов, среди них бóльшая часть приходится именно на нарушения сердечно-сосудистой системы [3]. Возраст особей, для которых встречаемость пороков сердечно-сосудистой системы наибольшая – от 29 до 56 дней [4]. Врожденные нарушения сердца у поросят ассоциированы с микроциркуляторной дисфункцией, стенозами сосудов, дисплазией клапанов, воспалительным процессом в миокарде [3, 4]. Сообщается о стресс-синдроме поросят, который является одной из причин внезапной смерти свиней в группах откорма. Данный синдром имеет генетическую природу, однако, есть и другие факторы, приводящие к внезапной смерти свиней ввиду поражения миокарда – высокая плотность поголовья, ненадлежащие ветеринарно-санитарные условия содержания, стресс перед убоем и другие [5].

Нарушение работы сердца у молодняка сельскохозяйственных животных связано также с миокардиодистрофией – процессом, включающим вегетативные, дисметаболические и ферментативные расстройства. При миокардиодистрофии дистрофические, некротические, сосудистые и воспалительные изменения в миокарде соответствуют очагово-диффузному межуточному миокардиту подострого типа течения [6].

Изменения в сердечной мышце в каждом случае носят особый характер, позволяющий дифференцировать различные состояния. Так, свиньи, павшие от стресс-синдрома, характеризуются развитием миокардиопатии в виде дистрофии и лизиса мышечных волокон. Нарушение процессов метаболизма проявляется постепенным развитием белковой дистрофии, некрозом мышечных волокон. При наличии бактериальной или вирусной инфекции наряду с некрозом мышечных волокон отмечается воспалительная инфильтрация [5, 7].

Сердечные патологии, такие как ишемическая болезнь сердца, кардиомиопатия и другие, могут иметь разную природу, включая врожденные факторы, системную инфекцию, нарушение обмена, в частности липидного [8, 9]. Многие из вышеперечисленных состояний характеризуются развитием воспалительной реакции [10]. Морфологические изменения при воспалительном процессе в миокарде включают диффузную инфильтрацию, микроциркуляторные расстройства, очаговый некроз кардиомиоцитов, дистрофические изменения мышечных клеток, разрастание соединительной ткани и фиброз [6, 11].

В последнее время обсуждается роль нарушения баланса цитокинов в воспалительном процессе и повреждении кардиомиоцитов [12, 13]. В воспалительном инфильтрате отмечается высокое содержание иммунных клеток, например, CD45-, CD68- и CD43-положительных, экспрессирующих провоспалительные факторы [11]. Сами кардиомиоциты также способны к выработке таких цитокинов [14]. Ряд цитокинов, включая интерлейкины IL-1, IL-4, IL-6, участвует в развитии различных воспалительных сердечных патологий, а именно ишемической болезни сердца, инфаркта миокарда, сердечной недостаточности и кардиомиопатии. В то же время такие цитокины, как IL-2, IL-8 и IL-10 участвуют в восстановлении тканей сердца после ишемии [10]. Одним из интерлейкинов, обладающих сразу двумя эффектами, является IL-6. Наряду с иммунокомпетентными клетками, являющимися его продуцентами, IL-6 высвобождается и кардиомиоцитами [15, 16]. Хронически повышенный уровень IL-6 ассоциирован с фиброзом миокарда [17]. С другой стороны, признано, что недостаток IL-6 при индуцированном ожирении приводит к гипертрофии кардиомиоцитов, фиброзным изменениям и воспалению, а кратковременное провоспалительное действие IL-6 имеет протекторный эффект [9, 16, 18, 19]. Кроме того, IL-6 участвует в антиоксидантной защите кардиомиоцитов при воспалительном повреждении миокарда [18].

Несмотря на то, что клиническая картина миокардита у свиней описана достаточно подробно, закономерности экспрессии провоспалительных маркеров в сердце и взаимосвязи с морфологическими изменениями миокарда описаны только для человека и грызунов. Актуальность данной работы обусловлена малым количеством работ по гистологическому исследованию сердечной мышцы сельскохозяйственных животных, в частности, свиней.

Цель исследований – изучить патоморфологические изменения миокарда у поросят раннего возраста с использованием гистохимических методов.

Научная новизна – использование комплекса гистохимических методов для описания взаимосвязи морфологических изменений миокарда с экспрессией интерлейкина IL-6 кардиомиоцитами у поросят разного возраста.

Материал и методы. Для изучения морфологических изменений миокарда поросят породы дюрок постмортально был отобран материал от животных без инфекционной, инвазионной патологии следующих возрастов: 1-2 месяца (n = 3), 3 месяца (n = 6), 4,5–5,0 месяцев (n = 4). Для гистологических исследований кусочки тканей толщиной не более 0,5 см фиксировали в 10%-м забуференном нейтральном формалине в соотношении 1:20. После фиксации в формалине образцы промывали в проточной воде, обезвоживали, затем пропитывали парафином и готовили парафиновые блоки. Изготавливали парафиновые срезы толщиной 3-4 мкм. Срезы депарафинизировали и окрашивали гистологическими красителями: гематоксилином и эозином, по Маллори, ГОФП (гематоксилином – основным фуксином – пикриновой кислотой). Окрашивание гематоксилином и эозином использовали для описания общей морфологической картины, окраску по Маллори – для оценки состояния соединительнотканных элементов, окраску ГОФП – для выявления повреждения миокарда. Проводили иммуногистохимическое окрашивание образцов с антителами к IL-6. Для иммуногистохимического исследования срезы помещали на стекла с адгезивным покрытием (superfrost), далее – на сушильный столик (температура 60 °С) до визуального расплавления парафина. Иммуногистохимическое исследование проводили по стандартному протоколу[1] с учетом рекомендаций производителей используемых реактивов:

1. Срезы помещали в буферный раствор трис-ЭДТА (трис-этилендиаминтетрауксусная кислота), нагретый на водяной бане до температуры 96 °С на 15 минут для проведения температурной демаскировки (HIER, pH = 6; «ПраймБиоМед», Россия).

[1]Иммуногистохимия (ИГХ). Этапы исследования. BioVitrum. Официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: https://biovitrum.ru/articles/immunogistokhimiya-igkh-etapy-issledovaniya-.html (дата обращения: 24.06.2025).

2. После 15-минутной инкубации на водяной бане срезы оставляли в буфере остывать до комнатной температуры, после чего промывали их дистиллированной водой.

3. Срезы инкубировали в растворе пероксида водорода H_2O_2 в течение 10 минут, после чего помещали в дистиллированную воду на 2 минуты.

4. Срезы обсушивали, обводили гидрофобным маркером.

5. Срезы заливали буфером TBST (Tris-buffered saline with Tween-20) на 1 минуту.

6. На срезы наносили первичные антитела и инкубировали во влажной камере в течение 1 часа при температуре 30 °C.

7. Срезы трижды промывали буфером TBST.

8. На срезы наносили вторичные антитела и инкубировали во влажной камере в течение 30 минут при температуре 30 °C.

9. Срезы трижды промывали TBST.

10. На срезы наносили хромоген DAB (3,3′-диаминобензидин) и инкубировали до потемнения срезов примерно 30–60 секунд.

11. Срезы промывали в дистиллированной воде.

12. Срезы докрашивали гематоксилином в течение 10 секунд.

13. Срезы промывали в дистиллированной воде, осветляли и заключали в бальзам.

В качестве первичных антител использовали антитела к IL-6 (Cloud-Clone, Китай) в разведении 1:100. В качестве вторичных применяли антитела iVision Poly-HRP (Xiamen Talent Biomedical Technology, Китай) с использованием DAB в качестве субстрата пероксидазы хрена (*Horseradish peroxidase*, HRP) в соответствии с рекомендациями производителя.

Проводили гистологическое описание и морфо-количественный анализ препаратов, окрашенных ГОФП. При данном способе поврежденные кардиомиоциты окрашиваются в красный цвет ввиду появления в их цитоплазме фуксинофильного субстрата, интактные мышечные волокна окрашиваются в различные оттенки зеленовато-желтого или желто-коричневатого цвета.

Было изучено 26 гистологических препаратов, в каждом из которых проанализировано по 10 полей зрения. С помощью программы ImageJ измеряли площадь (%), занимаемую поврежденными кардиомиоцитами. Статистическую обработку результатов проводили в программе Statistica 12.0. Выборки данных сравнивали с помощью непараметрического критерия Краскела-Уоллиса с последующим post-hoc тестом Данна; данные представляли в виде медианы и интерквартильного размаха Me [Q1–Q3]. Значение уровня значимости p было принято равным 0,05.

Результаты и их обсуждение. У поросят в возрасте 1-2 месяцев при окрашивании препаратов сердца гематоксилином и эозином видно неравномерное окрашивание кардиомиоцитов, утолщение соединительнотканных структур с включением рассеянной лимфоидно-клеточной инфильтрации, обнаруживаются кровоизлияния и очаги развивающегося миокардита. Отмечаются участки с расширенными кровеносными сосудами. При окрашивании препаратов сердца по Маллори в структуре его видны значительные участки разрастания соединительной ткани, которая представлена рыхло расположенными коллагеновыми волокнами и незначительным количеством сосудов разного калибра. При этом стенки сосудов утолщены. При окрашивании препаратов ГОФП основная часть кардиомиоцитов имеет желтый цвет, что соответствует норме, однако, в некоторых участках обнаруживаются массивные очаги с сильным повреждением мышечных волокон, окрашенных в красный цвет. В таких участках сердечной мышцы обнаруживаются также и кровоизлияния (рис. 1: 1a, 1b, 1c). При иммуногистохимическом окрашивании препаратов с антителами к IL-6 только в таких очагах повреждения миокарда отмечена интенсивная положительная реакция кардиомиоцитов (рис. 1: 1d), что является характерным при развитии воспалительного процесса [20].

У поросят в возрасте 3 месяцев мышечные волокна сердца неравномерно окрашены гематоксилином и эозином. Имеются участки просветления и более контрастно выступающие, окрашенные в ярко-розовый цвет зоны, что, возможно, связано с неравномерным накоплением гликогена. Выявлено разрастание соединительной ткани с пролиферацией клеток фибробластического ряда и включением рассеянной полиморфно-клеточной инфильтрации. Сосудистые стенки в состоянии дезорганизации их элементов. Окрашивание по Маллори подтверждает вышеописанное: отмечается неравномерное распределение миоглобина в мышечных волокнах сердца, дезорганизация стенок кровеносных сосудов и периваскулярное разрастание соединительной ткани. При окраске препарата сердца ГОФП по всему

миокарду видны отдельные волокна, находящиеся в состоянии дистрофии или дефицита миоглобина (рис. 1: 2a, 2b, 2c). При иммуногистохимическом анализе также выявлена положительная реакция кардиомиоцитов на IL-6 в местах повреждения мышечных волокон, однако, менее интенсивная в сравнении с предыдущей группой (рис. 1, 2d).

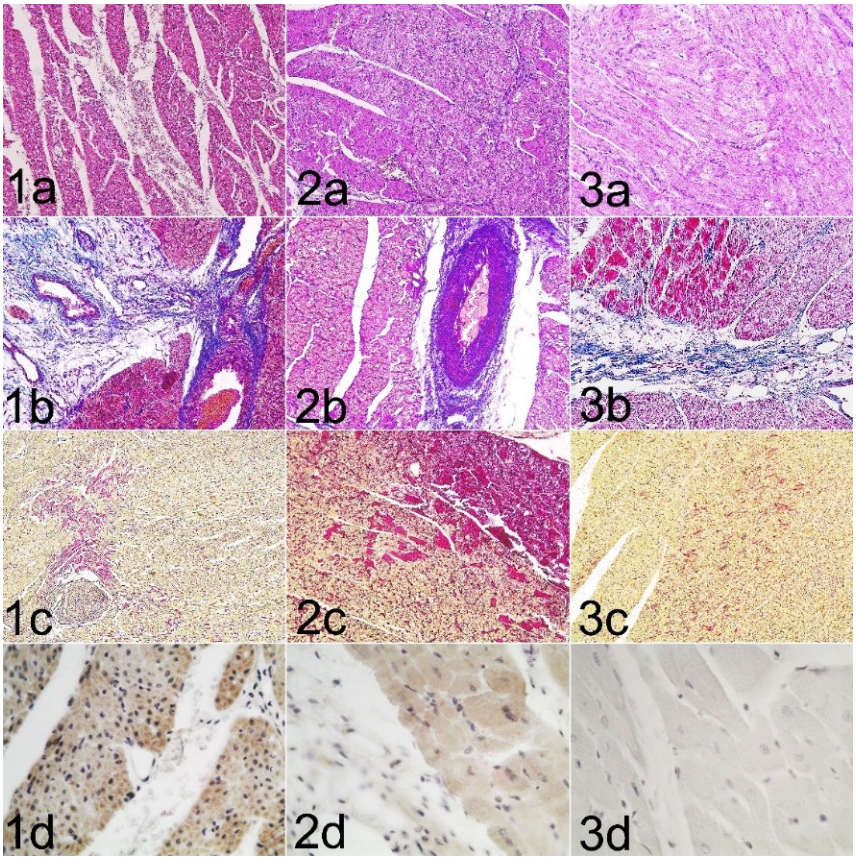


Рис. 1. **Комплекс патоморфологических изменений в миокарде сердца поросят разного возраста:** 1 – 1-2 месяца; 2 – 3 месяца; 3 – 4,5-5,0 месяцев; a – окрашивание гематоксилином и эозином, ув. х200; b – окрашивание по Маллори, ув. х200; c – окрашивание ГОФП, ув. х100; d – иммуногистохимическое выявление IL-6, докраска гематоксилином, ув. х200, х400 /

Fig. 1 **Complex of pathomorphological changes in the cardiac myocardium of piglets of different age:** 1 – piglets aged 1-2 months, 2 – piglets aged 3 months, 3 – piglets aged 4.5-5 months; a – hematoxylin and eosin staining, magnification x200; b – Mallory staining, magnification x200; c – HBFP staining, magnification x100; d – immunohistochemical detection of IL-6, hematoxylin counterstaining, magnification x200, x400

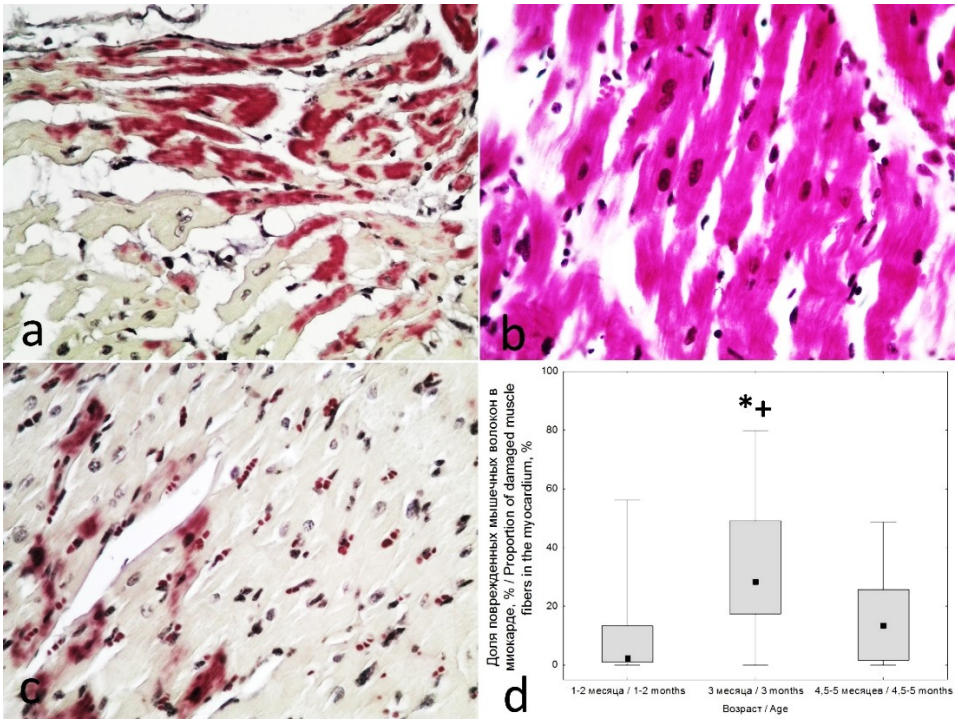
У поросят в возрасте 4,5-5,0 месяцев при исследовании препаратов сердца, окрашенных гематоксилином и эозином, а также по Маллори, обнаружена неравномерная окраска, разрастание и фрагментация волокон соединительной ткани, очаги полиморфно-клеточной инфильтрации, что соответствует развитию миокардита. Отмечены изменения, затрагивающие и микроциркуляторное русло: сосуды с гиалинозом стенки, пролиферацией и отслойкой эндотелия, формированием атеросклеротических бляшек. Аналогичную картину наблюдали и при окрашивании препаратов ГОФП. По всему миокарду наблюдаются небольшие очаги поврежденных кардиомиоцитов, окрашенные в ярко-малиновый цвет на фоне интактных неповрежденных волокон желтого цвета. В поврежденных мышечных волокнах ядра имеют нечеткие очертания, то есть подвергаются лизису. В то же время на фоне погибших волокон наблюдается процесс миогенеза: появляются незрелые мышечные волокна, ядра в которых занимают осевое положение. В таких участках миокарда перимизий представлен узкими полосками соединительной ткани богатой сосудами микроциркуляторного русла (рис. 1: 3a, 3b, 3c). Иммуногистохимическое исследование не выявило положительной реакции кардиомиоцитов на IL-6 в миокарде (рис. 1, 3d).

Разная интенсивность экспрессии IL-6 кардиомиоцитами связана, вероятно, с постепенной активацией компенсаторно-приспособительных механизмов. На раннем этапе развития воспалительной реакции и деструктивных

изменений миокарда отмечена интенсивная положительная реакция на выявление IL-6 в очагах повреждения. В возрасте 4,5-5,0 месяцев кардиомиоциты не экспрессируют данный маркер, по всей видимости, ввиду постепенного лизиса старых, поврежденных волокон и формирования новых кардиомиоцитов.

Сердечная ткань представляет собой показательный пример, где длительность экспрессии IL-6 демонстрирует переход от защитной функции до патологического повреждения [16]. IL-6 обуславливает защиту кардиомиоцитов во время инициации воспалительного процесса, однако, если его уровень остается повышенным хронически, это вызывает нарушение структуры и функций миокарда [21]. Кроме того, на ранних этапах развития патологического процесса IL-6 запускает антиапоптотическую программу [22], что позже корректируется активацией регенераторных механизмов, в связи с чем интенсивность экспрессии снижается. Это подтверждается работами, в которых показано, что продолжение экспрессии IL-6 приводит к гипертрофии, приводящей к сердечной недостаточности [16, 23].

Морфометрическое исследование показало, что у поросят в возрасте 3 месяцев доля поврежденных мышечных волокон значительно выше, чем у поросят других возрастных групп (рис. 2, d). При окрашивании ГОФП по всему миокарду определяются крупные и обширные участки дегенерации миокарда, окрашенные в ярко-малиновый цвет, что соответствует картине ишемического повреждения [24]. Зоны ишемии лишены исчерченности, а в некоторых клетках не определяются ядра (рис. 2, b). У поросят в возрасте 1-2 месяцев площадь, занимаемая поврежденными волокнами, значительно меньше, что соотносится с данными морфологического анализа: повреждения носят очаговый характер; основной объем миокарда окрашивается в желтый цвет. Интересно отметить, что окрашивание ГОФП особенно эффективно для выявления поражения сердечной мышцы на ранних этапах, поскольку в поражённых кардиомиоцитах фуксинофильный субстрат появляется вблизи ядра, а затем распространяется по всей цитоплазме, что характерно для сердца поросят данной возрастной группы (рис. 2, a) [25].



Уровень статистической значимости различий: * – с группой «1-2 месяца» ($p<0,05$); + – с группой «4,5-5,0 месяцев» ($p<0,05$) / Level of statistical significance of the differences: * – with the "1-2 months" group ($p<0.05$); + – with the "4.5-5 months" group ($p<0.05$)

Рис. 2. **Поврежденные кардиомиоциты в сердце поросят разного возраста, окрашивание ГОФП, ув. х400:** a – 1-2 месяца; b – 3 месяца; c – поросята 4,5-5,0 месяцев; d – доля поврежденных мышечных волокон в миокарде, % /

Fig. 2: **Damaged cardiomyocytes in the hearts of piglets, HBFP staining, magnification x400:** a – piglets aged 1-2 months, b – piglets aged 3 months, c – piglets aged 4.5-5,0 months; d – proportion of damaged muscle fibers in the myocardium, %

В миокарде свиней в возрасте 4,5-5,0 месяцев участки с поврежденными кардиомиоцитами определяются в меньшем количестве (рис. 2, с). Фуксинофильный субстрат обнаруживается в отдельных кардиомиоцитах. Известно, что когда мышечные волокна начинают разрушаться и подвергаться лизису, фуксинофильный субстрат полностью исчезает, и окраска ГОФП утрачивает свое значение [25]. Возможно, что наблюдаемая картина связана с разрушением поврежденных мышечных волокон. Кроме того, обнаружение участков миогенеза, вероятно, свидетельствует об активации компенсаторно-приспособительных механизмов и нормализации структурно-функционального состояния миокарда.

Выводы. 1. Процессы деструктивного характера в миокарде свиней при промышленном содержании начинают развиваться в раннем онтогенезе. На морфологическом уровне это проявляется в неравномерном окрашивании мышечных волокон, наличии очагов поврежденных и разрушающихся кардиомиоцитов, разрастании соединительнотканных элементов, воспалительной инфильтрации, а также целого комплекса микроциркуляторных изменений.

2. С воспалительным повреждением миокарда связана выработка кардиомиоцитами провоспалительного цитокина IL-6, который играет двоякую роль, с одной стороны, являясь инициатором альтерации, с другой – кардиопротектором, защищающим клетки от апоптоза, окислительного стресса и повреждения.

3. В разных возрастных группах степень деструктивных изменений различна и коррелирует с интенсивностью положительной реакции мышечных клеток на IL-6. Это соотносится с результатами окрашивания сердечной ткани ГОФП, показывающими, что на ранних этапах развития повреждения в значительной части волокон обнаруживается фуксинофильный субстрат, исчезающий по мере хронизации воспалительного процесса, а затем активации компенсаторно-приспособительных механизмов.

References

1. Сальникова Е. П., Тихонова Н. А. Микроскопические изменения поджелудочной железы и сердца свиней при патологии печени. Морфология. 2008;133(2):118a.

Salnikova E. P., Tikhonova N. A. Microscopical changes of the pancreas and the heart of the pigs with liver pathology. *Morfologiya* = Morphology. 2008;133(2):118a. (In Russ.).

2. Khan U., Petrechko O., Sagheer Sh., Majeed H., Zaidi S. H., Wasty N., Sheikh A. B. Acute Pancreatitis and Myocardial Infarction: A Narrative Review. Cardiology. 2023;148(1):1–11. DOI: https://doi.org/10.1159/000528535

3. Holyoake P. K., Stevenson J., Moran C., Stokes R., Kirk E. P., Sugo E., Hawthorne W. J. The occurrence of congenital heart defects in an inbred herd of pigs in Australia. Australian Veterinary Journal. 2006;84(4):129–133. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1751-0813.2006.tb13395.x

4. Hsu F. S., Du S. J. Congenital heart diseases in swine. Veterinary Pathology. 1982;19(6):676–686. DOI: https://doi.org/10.1177/030098588201900601

5. Балабанова В. И., Кудряшов А. А. Патоломорфологические изменения в сердце откормочных свиней, павших от стрессового воздействия. Актуальные вопросы ветеринарной биологии. 2019;4(44):59–63. DOI: https://doi.org/10.24411/2074-5036-2019-10055 EDN: LZJVNX

Balabanova V. I., Kudryashov A. A. Pathomorphological changes in the heart of fattening pigs wich died from stress. *Aktualniye voprosi veterinarnoy biologii* = Actual questions of veterinary biology. 2019;4(44):59–63. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24411/2074-5036-2019-10055

6. Копылов С. Н., Разницына В. А. Морфологическая характеристика миокарда у телят с клиническими признаками миокардиодистрофии. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2014;(4):31–34. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21699657 EDN: SGWEVX

Kopilov S. N., Raznitsina V. A. Morphological characteristics of the cardiac muscle in calves showing clinical signs of myocardiodystrophy. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2014;(4):31–34. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21699657

7. Балабанова В. И., Кудряшов А. А., Устенко Ж. Ю., Максимов Т. П. Патология сердца при стрептококкозе поросят группы откорма. Актуальные вопросы ветеринарной биологии. 2018;2(38):50–54. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35098898 EDN: XQLVOX

Balabanova V. I., Kudryashov A. A., Ustenko Zh. Yu., Maksimov T. P. Streptococcosis cardiac pathology in piglet pattening group. *Aktualniye voprosi veterinarnoy biologii* = Actual questions of veterinary biology. 2018;2(38):50–54. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35098898

8. Стельмашенко А. И., Андреев С. Л., Литвинова Л. С., Малащенко В. В., Тодосенко Н. М., Газатова Н. Д. и др. Цитокиновый профиль клеток миокарда при ишемической болезни сердца и ишемической кардиомиопатии. Цитология. 2023;65(5):461–474. DOI: https://doi.org/10.31857/S0041377123050097 EDN: POBBZE

Stelmashenko A. I., Andreev S. L., Litvinova L. S., Malashchenko V. V., Todosenko N. M., Gazatova N. D. et al. Cytokine profile of myocardial cells in coronary heart disease and ischemic cardiomyopathy. *Tsitologiya*. 2023;65(5):461–474. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.31857/S0041377123050097

9. Chen F., Chen D., Zhao X., Yang S., Li Z., Sanchis D. et al. Interleukin-6 deficiency facilitates myocardial dysfunction during high fat diet-induced obesity by promoting lipotoxicity and inflammation. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Molecular Basis of Disease. 2017;1863(12):3128–3141. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2017.08.022

10. Bartekova M., Radosinska J., Jelemensky M., Dhalla N. S. Role of cytokines and inflammation in heart function during health and disease. Heart Failure Reviews. 2018;23(5):733–758. DOI: https://doi.org/10.1007/s10741-018-9716-x

11. Calabrese F., Rigo E., Milanesi O., Boffa G. M., Angelini A., Valente M., Thiene G. Molecular diagnosis of myocarditis and dilated cardiomyopathy in children: clinicopathologic features and prognostic implications. Diagnostic Molecular Pathology. 2002;11(4):212–221. DOI: https://doi.org/10.1097/00019606-200212000-00004

12. Timonen P., Magga J., Risteli J., Punnonen K., Vanninen E., Turpeinen A. et al. Cytokines, interstitial collagen and ventricular remodelling in dilated cardiomyopathy. International Journal of Cardiology. 2008;124(3):293–300. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2007.02.004

13. Stelmashenko A. I., Andreev S. L., Litvinova L. S., Malashchenko V. V., Todosenko N. M., Gazatova N. D. et al. The cytokine profile of myocardial cells with coronary heart disease and ischemic cardiomyopathy. Cell and Tissue Biology. 2024;18:45–57. DOI: https://doi.org/10.1134/S1990519X24010097

14. Calabrese F., Carturan E., Chimenti C., Pieroni M., Agostini C., Angelini A. et al. Overexpression of tumor necrosis factor (TNF)alpha and TNFalpha receptor I in human viral myocarditis: clinicopathologic correlations. Modern Pathology. 2004;17(9):1108–1118. DOI: https://doi.org/10.1038/modpathol.3800158

15. Su J. H., Luo M. Y., Liang N., Gong S. X., Chen W., Huang W. Q. et al. Interleukin-6: A novel target for cardio-cerebrovascular diseases. Frontiers in pharmacology. 2021;12:745061. DOI: https://doi.org/10.3389/fphar.2021.745061

16. Fontes J. A., Rose N. R., Čiháková D. The varying faces of IL-6: From cardiac protection to cardiac failure. Cytokine. 2015;74(1):62–68. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cyto.2014.12.024

17. Meléndez G. C., McLarty J. L., Levick S. P., Du Y., Janicki J. S., Brower G. L. Interleukin 6 mediates myocardial fibrosis, concentric hypertrophy, and diastolic dysfunction in rats. Hypertension. 2010;56(2):225–231. DOI: https://doi.org/10.1161/HYPERTENSIONAHA.109.148635

18. Peng Y., Yang Q., Gao S., Liu Z., Kong W., Bian X. et al. IL-6 protects cardiomyocytes from oxidative stress at the early stage of LPS-induced sepsis. Biochemical and Biophysical Research Communications. 2022;603:144–152. DOI: https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2022.03.013

19. Tang P., Ma S., Dong M., Wang J., Chai S., Liu T., Li J. Effect of interleukin-6 on myocardial regeneration in mice after cardiac injury. Biomedecine & Pharmacotherapie. 2018;106:303–308. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biopha.2018.06.090

20. Gwechenberger M., Mendoza L. H., Youker K. A., Frangogiannis N. G., Smith C. W., Michael L. H., Entman M. L. Cardiac myocytes produce interleukin-6 in culture and in viable border zone of reperfused infarctions. Circulation. 1999;99(4):546–551. DOI: https://doi.org/10.1161/01.cir.99.4.546

21. Terrell A. M., Crisostomo P. R., Wairiuko G. M., Wang M., Morrell E. D., Meldrum D. R. Jak/STAT/SOCS signaling circuits and associated cytokine-mediated inflammation and hypertrophy in the heart. Shock. 2006;26(3):226–234. DOI: https://doi.org/10.1097/01.shk.0000226341.32786.b9

22. Yang S., Zheng R., Hu S., Ma Y., Choudhry M. A., Messina J. L. et al. Mechanism of cardiac depression after trauma-hemorrhage: increased cardiomyocyte IL-6 and effect of sex steroids on IL-6 regulation and cardiac function. American journal of physiology. Heart and Circulatory Physiology. 2004;287(5):H2183–H2191. DOI: https://doi.org/10.1152/ajpheart.00624.2003

23. Watson L. E., Annandale M., MacRae C. L., Bai J., Dayaram J., Burgess N. et al. An IL6 variant -174 G-C alters cardiac hypertrophy but not cardiometabolic responses to HFD in mice. npj Metabolic Health and Disease. 2026;4:13. DOI: https://doi.org/10.1038/s44324-026-00107-3

24. Ванг Ю., Смолярчук Е. А., Кудлай Д. А., Щекин В. С., Завадич К. А., Сологова С. С. и др. Способ оценки повреждения миокарда в условиях перфузии изолированного сердца по методу Лангендорфа. Фармация и фармакология. 2024;12(2):105–116. DOI: https://doi.org/10.19163/2307-9266-2024-12-2-105-116 EDN: DCXHAB

Wang Y., Smolyarchuk E. A., Kudlay D. A., Shchekin V. S., Zavadich K. A., Sologova S. S. et al. Method for assessing myocardial damage under conditions of perfusion of an isolated heart according to the Langendorff method. *Farmatsiya i farmakologiya* = Pharmacy & Pharmacology. 2024;12(2):105–116. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.19163/2307-9266-2024-12-2-105-116

25. Гущин Я. А. Применение дополнительных гистологических методов окраски в доклинических исследованиях. Лабораторные животные для научных исследований. 2019;(4):7.
DOI: https://doi.org/10/29926/2618723X-2019-04-07 EDN: AOUWVU

Gushchin Ya. A. Additional histological methods of stainig in preclinical studies. *Laboratorniye zhivotniye dlya nauchnikh issledovany* = Laboratory Animals for Science. 2019;(4):7. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10/29926/2618723X-2019-04-07

Вклад авторов: Петрова И. М., Бытов М. В. – концепция и план исследования, анализ данных, подготовка рукописи; Хацко С. Л. – концепция и план исследования; Дроздова Л. И. – анализ данных, подготовка рукописи; Шкуратова И. А. – концепция и план исследования, анализ данных.

Сведения об авторах

Петрова Ирина Михайловна, лаборант, ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», ул. Белинского 112а, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620142, e-mail: info@urfanic.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0002-4358-5219**

✉ **Бытов Максим Владимирович**, младший научный сотрудник, ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», ул. Белинского 112а, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620142, e-mail: info@urfanic.ru,
ORCID: **https://orcid.org/0000-0002-3622-3770,** e-mail: bytovmaks@mail.ru

Хацко Сергей Леонидович, лаборант, ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», ул. Белинского 112а, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620142, e-mail: info@urfanic.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0001-5921-6680**

Дроздова Людмила Ивановна, доктор вет. наук, профессор, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», ул. Белинского 112а, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620142, e-mail: info@urfanic.ru,
ORCID: **https://orcid.org/0000-0001-9689-1781**

Шкуратова Ирина Алексеевна, доктор вет. наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», ул. Белинского 112а, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620142,
e-mail: info@urfanic.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0003-0025-3545**

Author contributions: Petrova I. M., Bytov M. V. – research concept and plan, data analysis, manuscript preparation; Khatsko S. L. – research concept and plan; Drozdova L. I. – data analysis, manuscript preparation; Shkuratova I. A. – research concept and plan, data analysis.

Information about the authors

Irina M. Petrova, laboratory assistant, Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 112a Belinsky str., Ekaterinburg, Russian Federation, 620142, e-mail: info@urfanic.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0002-4358-5219**

✉ **Maksim V. Bytov**, junior researcher, Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 112a Belinsky str., Ekaterinburg, Russian Federation, 620142, e-mail: info@urfanic.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0002-3622-3770**, e-mail: bytovmaks@mail.ru

Sergey L. Khatsko, laboratory assistant, Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 112a Belinsky str., Ekaterinburg, Russian Federation, 620142, e-mail: info@urfanic.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0001-5921-6680**

Lyudmila I. Drozdova, DSc in Veterinary, professor, leading researcher, Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 112a Belinsky str., Ekaterinburg, Russian Federation, 620142, e-mail: info@urfanic.ru, **ORCID**: **https://orcid.org/0000-0001-9689-1781**

Irina A. Shkuratova, DSc in Veterinary, professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, chief researcher, Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 112a Belinsky str., Ekaterinburg, Russian Federation, 620142, e-mail: info@urfanic.ru,
ORCID: **https://orcid.org/0000-0003-0025-3545**

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.457–466
УДК 619:615.371:636.1(470+517)

(cc) BY

Результаты разработки вакцины против мыта лошадей для России и Монголии

© 2026. М. П. Неустроев, Е. И. Эльбядова✉
Якутский научно-исследовательский институт сельского хозяйства им. М. Г. Сафронова – обособленное подразделение ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», г. Якутск, Российская Федерация

Инфекционное заболевание мыт лошадей встречается повсеместно и представляет серьезную проблему, приводящую к существенным экономическим потерям в отрасли коневодства. Учитывая отсутствие эффективных и безопасных способов специфической профилактики этой болезни, на территории России и Монголии была разработана новая инактивированная вакцина для борьбы с мытом, включающая иммуностимулирующий компонент. В отличие от зарубежных аналогов, содержащих антибиотики широкого спектра действия, разработанная вакцина характеризуется отсутствием вредных побочных эффектов, что подтверждено результатами доклинических и клинических испытаний на лабораторных и целевых животных (жеребятах), демонстрируя высокую эффективность и безопасность. В результате изучения острой токсичности вакцины на белых лабораторных мышах внутрижелудочным способом введения в максимально допустимом объеме (1 см^3) установлено отсутствие выраженного токсического воздействия тестируемого препарата на организм лабораторных животных. После окончания срока наблюдения (7 дней) масса тела животных опытной группы увеличилась на 0,6 г, контрольной – на 0,5 г. Пирогенность вакцины изучена на кроликах породы белый великан введением вакцины в ушную вену в дозе 0,1 см^3, аналогичную дозу физиологического раствора вводили кроликам контрольной группы. Сравнительная оценка показателей температуры тела кроликов в обеих группах не выявила статистически значимых различий, что подтверждает апирогенность исследуемого препарата. Установлена высокая иммуногенность вакцины на белых мышах. Однократное подкожное введение 4×10^8 м.т./мл дозы вакцины гарантирует 90%-й иммунитет против возбудителя мыта при гибели 90 % невакцинированных животных в контроле. Иммунизирующая доза (ИмД) при однократном внутримышечном введении была определена 4×10^8 м.т./мл, обеспечивающая 80%-й уровень защиты. Вакцина успешно прошла процедуру утверждения и разрешена к применению на территории Российской Федерации и Монголии. Разработка представляет собой значительный прогресс в области ветеринарной иммунопрофилактики, предлагая безопасную и эффективную альтернативу существующим вакцинам против мыта лошадей.

Ключевые слова: *штамм, Streptococcus equi, Bacillus subtilis, инфекция, иммуногенность*

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (тема № 0297-2019-0046, регистрационный номер НИОКТР АААА-А20-120062590012-2; тема № FWRS 2024-0024, регистрационный номер НИОКТР 125012200649-8).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Неустроев М. П., Эльбядова Е. И. Результаты разработки вакцины против мыта лошадей для России и Монголии. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):457–466.
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.457-466

Поступила в редакцию: 26.06.2025 Принята к публикации: 15.04.2026
Доработана после рецензирования: 18.09.2025 Опубликована онлайн: 27.04.2026

Results of the development of a vaccine against strangles in horses for Russia and Mongolia

© 2026. Mikhail P. Neustroev, Evdokia I. Elbyadova✉
M. G. Safronov Yakut Scientific Research Institute of Agriculture – separate division Federal Research Centre «The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», Yakutsk, Russian Federation

Equine strangles, a widespread infectious disease, poses a serious problem resulting in significant economic losses in the horse breeding industry. As there are no effective and safe methods for specific prevention of this disease in Russia and Mongolia, a new inactivated vaccine against strangles, incorporating an immunostimulating component, has been developed. Unlike foreign analogues containing broad-spectrum antibiotics, the developed vaccine is characterized by the absence of harmful side effects, as confirmed by preclinical and clinical trials on laboratory and target animals (foals), demonstrating high efficacy and safety. As the result of the study of the vaccine high toxicity via intragastric administration at the maximum permissible volume (1 cm^3) in white laboratory mice there was established the absence of pronounced toxic effects of the tested preparation on the laboratory animals. By the end of the observation period (7 days), the body weight of animals in the experimental group

had increased by 0.6 g, and by 0.5 g in the control group. The vaccine pyrogenicity was studied in White Giant breed rabbits by intravenous injection into the ear vein at a dose of 0.1 cm³, with the control group rabbits receiving an equivalent dose of physiological saline. A comparative assessment of body temperature indicators in both rabbit groups revealed no statistically significant differences confirming the apyrogenicity of the product under study. High immunogenicity of the vaccine was established in white mice. A single subcutaneous injection of a 4×10⁸ CFU/mL dose of the vaccine provided 90 % immunity against the causative agent of strangles, with 90 % mortality observed in unvaccinated control animals. The immunizing dose (ID) for a single intramuscular administration was determined to be 4×10⁸ CFU/mL, providing an 80 % protection level. The vaccine has successfully undergone approval procedures and is authorized for use in the Russian Federation and Mongolia. This development product represents a significant advance in veterinary immunoprophylaxis offering a safe and effective alternative to the current vaccines against equine strangles.

Keywords: *strain, Streptococcus equi, Bacillus subtilis, infection, immunogenicity*

Acknowledgements: The research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Research Centre "The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences" (theme No. 0297-2019-0046, Registration Number R&D AAAA-A20-120062590012-2; theme No. FWRS 2024-0024, Registration Number R&D 125012200649-8).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

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

For citation: Neustroev M. P, Elbyadova E. I. Results of the development of a vaccine against strangles in horses for Russia and Mongolia. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):457–466. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.457-466

Received: 26.06.2025 Accepted for publication: 15.04.2024
Revised: 18.09.2025 Published online: 27.04.2026

Наиболее важным аспектом повышения продуктивности коневодства является контроль инфекционных заболеваний, среди которых ключевым является мыт лошадей. Данное заболевание, вызываемое *Streptococcus equi*, поражает преимущественно молодняк до одного года, проявляясь гнойным ринитом, лимфаденитом с последующим образованием абсцессов и системной интоксикацией [1, 2]. Комплексный экономический ущерб от мыта лошадей складывается из прямых затрат на лечение (длительные курсы антибиотиков, противовоспалительных и других препаратов, многократные вызовы ветеринара, диагностические процедуры, хирургическое вскрытие абсцессов), потерь продуктивности (замедление роста и развития молодняка, снижение или полное прекращение работоспособности и спортивного использования взрослых лошадей на длительный период, падеж, особенно среди жеребят).

Мыт широко распространен во всем мире и наносит значительный экономический ущерб. По информации Международного центра сбора данных[1], мыт лошадей с 2019 по 2025 г. зарегистрирован в Соединенных Штатах Америки (США, 612 случаев), Франции (425 случая) и Нидерландах (466 случаев). В Великобритании действует специальная система надзора за мытом лошадей[2], по которой за 2019–2025 гг. зарегистрировано 1747 лабораторно подтвержденных случаев заболевания в 95 округах. Согласно казахстанским исследованиям, заболеваемость инфекцией среди молодых лошадей составляет 30,1–46,7 %, а уровень смертности колеблется от 16,0 до 28,3 % [3]. Применение ПЦР-диагностики в группах риска (животные с клиническими подозрениями) в отдельных работах показывает частоту выявления возбудителя на уровне 90 % [4]. В Монголии, по данным за 2003–2012 гг. [5, 6, 7], вспышки мыта были зафиксированы в 3075 населённых пунктах, а показатель летальных исходов составил 2,73 %. В Кыргызстане мыт также имеет широкое распространение [8].

На территории Российской Федерации (РФ) данное заболевание наиболее широко распространено в регионах с высокой концентрацией коневодческих хозяйств. К числу таких субъектов относятся: Новосибирская, Иркутская, Алтайская области, Красноярский, Алтайский края, Республики Тыва, Хакасия, Башкортостан, Саха (Якутия). Именно в этих регионах интенсивное развитие отрасли животноводства, ориентированной на разведение лошадей, формирует благоприятную среду для циркуляции патогена в популяции.

В Якутии заболеваемость молодняка мытом ежегодно варьирует от 57,8 до 62,7 %, а летальность от 4,0 до 22,0 % [9]. В связи с этим в России, Монголии и Казахстане востребованы средства профилактики мыта лошадей.

[1]Международный центр сбора данных. [Электронный ресурс]. Equine Surveillance. URL: https://equinesurveillance.org/iccview/ (дата обращения: 10.04.2026).
[2]Система надзора за мытом лошадей Великобритании. [Электронный ресурс]. JShiny. URL: https://app.jshiny.com/jdata/ses/sesview/ (дата обращения: 10.04.2026).

В мире самым распространенным методом лечения мыта является антибиотикотерапия. Применение антибиотиков у лошадей, несмотря на высокую эффективность, сопряжено с рядом побочных эффектов, негативно сказывающихся на здоровье животных. Антибактериальные препараты широкого спектра действия не только подавляют патогенную микрофлору, но и нарушают естественный баланс кишечного микробиома, что может привести к дисбактериозу, снижению иммунитета и расстройствам пищеварения. Кроме того, длительная антибиотикотерапия способствует развитию резистентности у бактерий, что осложняет дальнейшее лечение инфекционных заболеваний [10, 11].

Современные исследования подтверждают, что ключевым инструментом сдерживания эпизоотий мыта выступает вакцинопрофилактика. В глобальной ветеринарной практике активно тестируются и внедряются специализированные препараты, направленные на формирование специфического иммунитета. Например, субъединичные вакцины (бесклеточные): Equivac S (Zoetis, Австралия); Strepguard (MSD Animal Health, США); Strepvax II (Boehringer Ingelheim, Германия). Данные препараты одобрены для применения в Австралии и США, однако их использование в европейских странах ограничено.

Живые аттенуированные вакцины для интраназального введения (Pinnacle IN, Zoetis, Австралия) – применяются в США, Канаде и Новой Зеландии [12]. Однако есть сообщения о том, что вакцина Pinnacle IN вызывает заболеваемость мытом после вакцинации [13, 14]. В Европе применяется живая аттенуированная мутантная вакцина Equilis StrepE (MSD Animal Health, США), действие которой кратковременное, а лошадей необходимо вакцинировать каждые 3–6 месяцев, что делает ее дорогостоящим мероприятием для владельцев [15]. На территории Великобритании для профилактики мыта лошадей активно используется иммунобиологический препарат Strangvac (Intervacc AB, Швеция), созданный методом генной инженерии на основе рекомбинантных белков *Streptococcus equi*. Клинические исследования демонстрируют, что устойчивый защитный эффект проявляется только после введения второй или третьей бустерной дозы, что указывает на необходимость многократной ревакцинации [16, 17]. Вакцина Strangvac отсутствует в перечне разрешённых препаратов для РФ, кроме того, схема введения (2–3 инъекции с интервалом 2–4 недели) ухудшает практическую реализуемость при массовой вакцинации, особенно в условиях крупных коневодческих хозяйств и табунного коневодства.

В ветеринарной практике Казахстана для профилактики мыта лошадей активно используется препарат «Акынтай» (Республика Казахстан), включающий комплекс инновационных компонентов: антибактериальные агенты широкого спектра, направленные на подавление вторичных инфекций, и адъювант полиоксидоний, выполняющий двойную функцию – усиление иммунного ответа и модуляция защитных механизмов организма [18]. Известно, что использование антибиотиков, хотя и распространено, подавляет полезную микрофлору и способствует появлению резистентных штаммов, а также сопровождается негативными последствиями для всего организма животных и человека, потребляющего в пищу продукты животноводства. Из литературных данных известно, что впервые разрабатывается инактивированная интраназальная вакцина против мыта лошадей на основе очищенных внеклеточных белковых антигенов с целью внедрения в ветеринарную практику Казахстана [19]. В России данные вакцины не могут применяться, так как они не прошли официальную проверку Россельхознадзора и не разрешены к использованию.

Цель исследования – разработка, экспериментальная проверка и внедрение в производство инактивированной вакцины против мыта лошадей, как безопасного и экологичного средства специфической профилактики заболевания, в условиях России и Монголии.

Научная новизна – впервые разработана, утверждена и внедрена в производство инактивированная вакцина с иммуномодулятором однократного применения для профилактики мыта лошадей в России и Монголии. Главной отличительной особенностью разработанной и утвержденной в Монголии вакцины является усовершенствованная технология получения культуральной жидкости (КЖ) штамма *Bacillus subtilis* ТНП-3, выступающего в роли иммуномодулятора.

Материал и методы. Работа проведена в лаборатории ветеринарной биотехнологии Якутского научно-исследовательского института сельского хозяйства им. М. Г. Сафронова, ООО НПЦ «Хоту-Бакт» и коневодческих хозяйствах Республики Саха (Якутия).

Доклинические и клинические испытания вакцины в России проведены согласно приказу Министерства сельского хозяйства РФ №101 от 6 марта 2018 г. «Об утверждении правил проведения доклинического исследования лекарственного средства для ветеринарного применения, клинического исследования лекарственного препарата для ветеринарного применения, исследования биоэквивалентности лекарственного препарата для ветеринарного применения»[3] и Федеральному закону от 12.04.2010 №61-ФЗ (в редакции от 02.08.2019) «Об обращении лекарственных средств»[4].

В составе вакцины против мыта, утвержденной в России и Монголии, в качестве активного вещества используется мытный антиген из штамма бактерий *Streptococcus equi* «Н-5/1», депонированный в ФГБУ «Всероссийский государственный Центр качества и стандартизации лекарственных средств для животных и кормов» (ФГБУ «ВГНКИ», регистрационный № ВКШМ-Б-141П, справка о депонировании от 22 мая 2018 г. и 12 июля 2023 г.). Инактивацию бактериальной массы проводили формалином. Гидроокись алюминия используется как адъювант в вакцинах. В качестве иммуномодулятора в состав вакцины добавлена культуральная жидкость штамма бактерий *Bacillus subtilis* ТНП-3, который депонирован в ФГБУ «ВГНКИ» (регистрационный № ВКШМ-Б-320П, справка о депонировании от 8 августа 2022 г.).

Технологический процесс производства иммуномодулятора включает культивирование штамма *Bacillus subtilis* ТНП-3 в мясо-пептонном бульоне (МПБ) в течение 5 суток с последующим центрифугированием (7000 об/мин, 15 мин) и кратковременной стерилизацией в автоклаве (0,5 атм, 3 мин). Данный усовершенствованный метод обеспечивает сохранение биологической активности штамма, ответственной за его иммуномодулирующие свойства, и минимизирует риск контаминации побочными патогенами на этапе изготовления.

Полученный иммуномодулятор смешивается с инактивированным антигеном в строго определенном соотношении 1:2. Одна доза вакцины объемом 3 мл содержит 2 мл антигена и 1 мл иммуномодулятора.

В рамках подготовки к исследованию острой токсичности белые мыши прошли двухдневный адаптационный период с клиническим наблюдением для исключения особей с отклонениями в состоянии здоровья, после чего животные были распределены на две группы по 3 особи в каждой. Экспериментальной группе однократно вводили вакцину против мыта лошадей в максимально допустимом объёме 1 см³ (2×10^9 колониеобразующих единиц, КОЕ/мл) внутрижелудочным способом с использованием зонда в утренние часы натощак, тогда как контрольная группа получала аналогичным методом 1 см³ стерильной дистиллированной воды, что позволило обеспечить сопоставимость условий введения и минимизировать влияние внешних факторов на результаты эксперимента.

В течение семидневного периода после введения препарата и стерильной дистиллированной воды проводилось клиническое наблюдение за животными с ежедневной регистрацией динамики массы тела.

В рамках подготовки к оценке пирогенных свойств препарата на кроликах породы белый великан за три дня до начала эксперимента осуществлялся ежедневный утренний мониторинг базовой температуры тела с использованием стандартного ртутного медицинского термометра. Испытание проводили на 2 группах по 3 головы здоровых кроликов мужского пола с массой тела 1,5-1,6 кг. За 18 часов до начала испытаний животные были переведены на режим пищевой депривации с сохранением неограниченного доступа к воде, а в ходе эксперимента кормление и поение полностью исключались. Предварительно, за 30 минут до введения препаратов, у каждого кролика двукратно фиксировали исходные температурные показатели. Испытуемой группе внутривенно (через краевую вену уха) вводили 0,1 см³ вакцины против мыта, контрольной группе инъецировали аналогичный объём 0,9%-го раствора хлорида натрия (NaCl). В течение трёх часов после инъекции температурная динамика отслеживалась с интервалами не более 30 минут, что обеспечило детекцию возможных пирогенных реакций, связанных с введением биопрепарата.

[3]Приказ Министерства сельского хозяйства РФ №101 от 6 марта 2018 г. «Об утверждении правил проведения доклинического исследования лекарственного средства для ветеринарного применения, клинического исследования лекарственного препарата для ветеринарного применения, исследования биоэквивалентности лекарственного препарата для ветеринарного применения». [Электронный ресурс]. URL: https://fsvps.gov.ru/files/prikaz-minselhoza-ot-6-marta-2018-g-n-101-ob-ut/ (дата обращения: 10.04.2026).

[4]Федеральный закон от 12.04.2010 №61-ФЗ (в редакции от 02.08.2019) «Об обращении лекарственных средств». [Электронный ресурс]. URL: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=102137440&backlink=1&&nd=102578588 (дата обращения: 10.04.2026).

Исследование иммуногенных характеристик вакцины проводили на белых мышах. Было сформировано 7 групп по 4 головы в каждой. На начальном этапе эксперимента устанавливали среднюю летальную дозу (LD_{50}) патогена. Используя культуру штамма *Streptococcus equi* «Н-5/1», выращенную на кровяном мясопептонном агаре (МПА), суспензию стандартизировали до целевой концентрации 2×10^9 КОЕ/мл. Последовательно формировали десятикратные разведения в апирогенном 0,9%-м растворе NaCl, получая ряд концентраций от 2×10^8 до 2×10^2 бактериальных единиц в 1 см^3. Четырем мышам из каждой экспериментальной группы вводили подкожно в дорсальную область 1,0 см^3 бактериальной суспензии соответствующего разведения. Контрольной группе инъецировали аналогичный объем стерильного изотонического раствора. На протяжении 15 суток осуществляли ежедневный мониторинг и регистрацию летальных исходов. Полная летальность (LD_{100}) была зафиксирована при концентрации 2×10^8 КОЕ/мл (200 млн микробных тел/мл). Расчетная LD_{50}, вызывающая 50%-ю смертность в популяции, соответствовала 2×10^5 КОЕ/мл (200 тыс. микробных тел/мл).

Эксперимент по установлению иммунизирующей дозы (ИмД) при подкожном введении выполняли на 60 белых мышах с массой тела 16–18 г. Животные были распределены на 6 групп по 10 особей в каждой, включая контрольную группу без иммунизации. Тестируемые объемы вакцины (0,1–0,5 см^3 с шагом 0,1 см^3) вводили субдермально в дорсальную зону 50 грызунам. Спустя 10 суток после вакцинации всем подопытным (включая контроль) инъецировали вирулентную культуру *Streptococcus equi* «Н-5/1» в дозе LD_{50} аналогичным способом.

С целью установления иммунизирующей дозы при внутримышечном введении были исследованы объемы вакцины 0,3; 0,2 и 0,1 см^3. Схема проведения теста повторяла протокол, использованный для подкожного введения. В соответствии с ней белые мыши были распределены на 4 группы по 10 особей в каждой, одна из групп служила негативным контролем (без иммунизации). Препарат животным вводили в каудальную часть бедра. Для оценки достоверности различий в эффективности вакцины между опытными и контрольными группами был применен t-критерий Стьюдента. Анализу подвергнуты данные по проценту выживших животных в каждой группе. Результаты представлены в виде среднего значения ± стандартное отклонение (M±SD) для 10 животных в группе. Статистическая значимость различий считалась достоверной при $p < 0,05$.

Клинические испытания вакцины проводили в коневодческих хозяйствах Республики Саха (Якутия). Для оценки безопасности вакцины против мыта использовали жеребят 1,3–1,5 лет. Сформировали 4 группы по 3 головы в каждой с разными схемами введения: 1 – однократно 3,0 см^3; 2 – трехкратно по 3,0 см^3 с интервалом 10 дней; 3 – однократно 4,0 см^3; 4 – трехкратно по 6,0 см^3 с интервалом 10 дней. Перед испытанием животные клинически обследованы, взяты фоновые образцы крови. Вакцину вводили внутримышечно в верхнюю треть шеи. Мониторинг включал анализ крови на 1-е, 16-е и 42-е сутки после иммунизации по гематологическим, биохимическим и серологическим показателям. Исследования крови проводили на базе лаборатории ветеринарной биотехнологии Якутского НИИ сельского хозяйства им. М. Г. Сафронова.

В ходе производственной апробации вакцины против мыта молодняк лошадей возрастом до 12 месяцев (n = 128) подвергли однократной внутримышечной иммунизации в дорсальную зону шейного отдела с дозировкой 3,0 см^3 в соответствии с протоколом применения.

Регистрационное досье и научно-техническая документация оформлены согласно формам соответствующих стандартов по формированию регистрационного досье на лекарственный препарат для ветеринарного применения в России и Монголии. Проведен лабораторный контроль вакцины в ФГБУ «ВГНКИ» и Монголии.

Результаты и их обсуждения. Результаты исследований острой токсичности показали, что в обеих группах отмечалось стабильное клиническое состояние: сохранение двигательной активности; адекватная реакция на внешние раздражители; отсутствие отклонений в потреблении корма и структуре шерсти; физиологически нормальная консистенция фекалий. К завершению эксперимента увеличение массы тела в опытной группе составило 0,6 г, в контроле – 0,5 г, что указывает на отсутствие достоверных различий и подтверждает низкую токсикологическую нагрузку вакцины при однократном внутрижелудочном введении. Сохранение физиологических параметров, стабильная прибавка массы, сопоставимая с контрольными показателями, и отсутствие клинических признаков интоксикации (включая диспепсические расстройства и угнетение центральной нервной системы) свидетельствуют о хорошей переносимости препарата. Результаты патологоанато-

мического исследования не выявили визуально определяемых патологий паренхиматозных органов, что в совокупности с клиническими данными позволяет сделать вывод об отсутствии выраженного токсического воздействия тестируемой вакцины на организм лабораторных животных.

Для определения пирогенных свойств вакцины осуществлена статистическая обработка полученных данных. При сравнении динамики изменения температуры тела в обеих группах с использованием t-критерия Стьюдента статистически значимых различий выявлено не было ($p>0,05$). Это подтверждает, что наблюдаемое повышение температуры не связано непосредственно с введением вакцины. Таким образом, проведенное исследование свидетельствует о том, что вакцина против мыта не оказывает пирогенного действия на кроликов. Зарегистрированные в обеих группах слабовыраженные температурные отклонения (в пределах 0,2-0,3 °C) носят, предположительно, неспецифический характер и коррелируют с адаптационным стрессом, индуцированным повторяющимися диагностическими процедурами (ректальная термометрия, фиксация), что исключает связь с пирогенными компонентами препарата и подтверждает соответствие вакцины фармакопейным требованиям по апирогенности.

Результаты изучения иммуногенности при подкожном способе введения (опытные группы 1–5) показали, что однократное введение дозы 4×10^8 м.т./мл (4-я опытная группа) обеспечивает 90%-й протективный иммунитет против патогена, подтвержденный гибелью 90 % невакцинированных особей в контрольной группе. Иммунизирующая доза ($ИД_{50}$), формирующая защиту у половины привитых животных, составила 2×10^8 м.т./мл (5-я опытная группа). Было выявлено, что все опытные группы, за исключением 5-й группы, показали статистически значимую высокую выживаемость по сравнению с контрольной. Также для оценки безопасности вакцины проводили наблюдения за общим состоянием и поведением вакцинированных животных. Не было выявлено каких-либо клинических признаков, свидетельствующих о негативном воздействии вакцины. Местные реакции в месте инъекции были незначительными и быстро проходили (табл.).

Таблица – **Определение иммунизирующей дозы вакцины на лабораторных животных при подкожном и внутримышечном способах введения /**
Table – **Determination of the immunizing dose of the vaccine on laboratory animals with subcutaneous and intramuscular administration**

Группа / Group	*Иммунизирующая доза (ИмД) (10^9 м.т.) / Immunizing dose (ImD) (10^9m.c.)*	*Микробных тел, млн / Microbial cells, million*	*Количество животных / Number of animals*	*Пало / Died*		*Выжило / Survived*		*p-value*
				гол. / heads	*%*	*гол. / heads*	*%*	
Подкожное введение (Streptococcus equi «H-5/1», 200 тыс. м.т./см^3) / Subcutaneous injection (Streptococcus equi «H-5/1», 200 thousand m.c./cm^3)								
1-я опытная / 1 experimental	0,5	1000	10	2	20	8	80	p<0,001
2-я опытная / 2 experimental	0,4	800	10	1	10	9	90	p<0,001
3-я опытная / 3 experimental	0,3	600	10	1	10	9	90	p<0,001
4-я опытная / 4 experimental	0,2	400	10	1	10	9	90	p<0,001
5-я опытная / 5 experimental	0,1	200	10	5	50	5	50	p = 0,067
Контрольная / Control	-	-	10	9	90	1	10	-
Внутримышечное введение (Streptococcus equi «H-5/1», 200 тыс. м.т./см^3) / Intramuscular injection (Streptococcus equi «H-5/1», 200 thousand m.c./cm^3)								
1-я опытная / 1 experimental	0,3	600	10	2	20	8	80	p<0,001
2-я опытная / 2 experimental	0,2	400	10	2	20	8	80	p<0,001
3-я опытная / 3 experimental	0,1	200	10	6	60	4	40	p = 0,104
Контрольная / Control	-	-	10	8	80	2	20	-

Внутримышечное введение (опытные группы 1–3) также показало высокую эффективность вакцины. Дозы 6×10^8 и 4×10^8 м.т. (1-2-я группы) обеспечили одинаковый уровень защиты – 80 % выживаемости, что существенно выше показателя в контрольной группе (20 % выживаемости). Снижение дозы до 2×10^8 м.т. (3-я группа) привело к статистически незначимому уровню защиты (40 % выживаемости) по сравнению с контролем. На основании этих данных минимальная иммунизирующая доза при внутримышечном введении была определена 4×10^8 м.т., обеспечивающая 80%-й уровень защиты.

Таким образом, проведенный комплекс доклинических исследований на модельных животных продемонстрировал соответствие препарата критериям биобезопасности и высокой специфической активности.

Полученные данные являются основанием для проведения дальнейших клинических исследований с целью оценки эффективности вакцины в полевых условиях и определения оптимальных схем вакцинации для целевых животных. Лабораторные испытания вакцины против мыта в Монголии подтвердили отсутствие токсичности, пирогенности и высокую иммуногенность на белых мышах.

На основании проведенного клинического испытания по оценке переносимости вакцины против мыта был проведен подбор оптимальной прививочной дозы для молодняка лошадей. Анализ гематологических и биохимических показателей после иммунизации продемонстрировал, что все режимы вакцинации являются безопасными и не вызывают отклонений от физиологической нормы. Наибольший интерес представляет схема однократного введения в дозе 3,0 см³, которая обеспечивала профилактическую защиту организма без стрессового воздействия. Данный режим, наряду с другими схемами введения, показал свою безопасность и может быть рекомендован для дальнейшего применения в производственных условиях.

Мониторинг физиологического статуса целевых животных (молодняк лошадей) в производственных условиях осуществляли на протяжении 6-7 месяцев, выявив клинические проявления заболевания лишь у 3 особей из вакцинированного поголовья, что свидетельствует о 97,66%-й эффективности профилактики. Отмечено, что применение препарата с иммуномодулятором на основе штамма *Bacillus subtilis* ТНП-3 индуцировало усиление фагоцитарной активности нейтрофилов (на 42 % выше базовых показателей) и формирование устойчивого гуморального иммунитета: серологический анализ на 30-е сутки поствакцинации зафиксировал преципитирующие антитела в титре 1:35, сохранявшиеся до 117-го дня наблюдения.

На фоне высокой заболеваемости мытом в Республике Саха (Якутия) [9] применение инактивированной вакцины с иммуномодулятором позволило добиться статистически высокодостоверного ($p<0,00001$) снижения заболеваемости до 2,34 % при эффективности 97,66 %, что подтверждает ее существенный вклад в профилактику. Полученные данные, включая динамику антителообразования и низкий уровень поствакцинальных осложнений, подтверждают целесообразность внедрения иммунобиологического препарата в схему иммунопрофилактики мыта.

Высокая профилактическая эффективность разработанной инактивированной вакцины обусловлена, по нашему мнению, удачным сочетанием антигенного комплекса и иммуномодулятора из супернатанта (фугата) бактерий *Bacillus subtilis* ТНП-3. Как показали наши предыдущие исследования, штамм *Bacillus subtilis* ТНП-3 способен индуцировать синтез интерферона и стимулировать иммунобиологическую реактивность организма, усиливая иммуногенность инактивированных бактериальных и вирусных вакцин [20]. Разработанный препарат демонстрирует сопоставимую с зарубежными аналогами иммуногенность, но превосходит их по безопасности, отсутствием местных реакций, антибиотиков и удобной схеме иммунизации.

Внедрение инновационной методики иммунопрофилактики мыта в условиях отдельного хозяйства продемонстрировало биоэкономическую эффективность с валовым доходом 3,99 тыс. руб./гол. при рентабельности 6,65 руб. на единицу инвестированных средств, что в масштабах региона обеспечит совокупный финансовый эффект 49,356 млн руб. за счёт снижения затрат на лечение, карантинные мероприятия и компенсацию падежа. Следовательно, разработанный способ специфической профилактики мыта лошадей является экономически и эпизоотически обоснованным. Вакцина показала хорошие результаты по всем исследуемым параметрам, что позволяет рекомендовать ее для широкого применения в ветеринарной практике.

В рамках процедуры регистрации биопрепарата «Вакцина против мыта лошадей инактивированная» сформирован полный пакет регистрационных материалов, соответствующий регламенту ФГБУ «ВГНКИ», где препарат прошёл многоуровневое испытание. По итогам экспертизы, вакцина внесена в Государственный реестр ветеринарных препаратов Россельхознадзора с присвоением номера № 71-1-27.21-4828 № ПВР-1-27.21/03691 от 08.12.2021. В 2022-2023 гг. выполнена адаптация документации под требования Монгольского ветеринарного надзора, что позволило получить регистрационное удостоверение №1211 QF (04.04.2023) и инструкцию по применению. В сентябре 2024 г. заключен проект лицензионного соглашения с ООО «Биокомбинат» (Монголия). В данное время подготавливаются нормативные документы на вакцину против мыта лошадей для регистрации в Республике Казахстан.

Научная новизна разработки подтверждена патентами на изобретение России «Штамм бактерий *Streptococcus equi*, используемый для изготовления вакцины против мыта лошадей» (2019)[5], «Способ специфической профилактики мыта лошадей вакциной с иммуномодулятором» (2024)[6]. Получен Евразийский патент на изобретение от 17 июля 2025 г.[7], а также сертификат соответствия «Сделано в России» от 5 сентября 2025 г.[8]. В настоящее время подана и рассматривается в Монголии заявка на международный патент для подтверждения научной новизны и завершения заключения лицензионного договора на производство вакцины против мыта в ООО «Биокомбинат».

Заключение. Разработанная вакцина против мыта лошадей сочетает экологичность, безопасность и высокую иммуногенность. Высокая профилактическая эффективность инактивированной вакцины обусловлена сочетанием антигенного комплекса и иммуномодулятора из супернатанта (фугата) бактерий *Bacillus subtilis* ТНП-3. Результаты комплексных доклинических и клинических исследований подтвердили, что применение вакцины в указанной дозировке и составе (3,0 см³) обеспечивает формирование эффективного иммунного ответа при однократном введении, исключающем необходимость ревакцинации. Применение вакцины позволит снизить эпизоотические риски и экономические потери в коневодстве России и Монголии.

Список литературы

1. Durham A. E., Hall Y. S., Kulp L., Underwood C. A study of the environmental survival of Streptococcus equi subspecies equi. Equine Veterinary Journal. 2018;50(6):861–864. DOI: https://doi.org/10.1111/evj.12840

2. Mitchell C., Steward K. F., Charbonneau A. R. L., Walsh S., Wilson H., Timoney J. F. et. al. Globetrotting strangles: The unbridled national and international transmission of Streptococcus equi between horses. Microbial Genomics. 2021;7(3):000528. DOI: https://doi.org/10.1099/mgen.0.000528

3. Еспембетов Б. А., Сармыкова М. К., Самбетбаев А. А., Серікбай Е. Б., Сырым Н. С., Зинина Н. Н., Анарбекова А. М., Тилеуханов К. К. Изучение эпизоотической ситуации мыта лошадей в Алматинской области. Биобезопасность и биотехнология. 2022;1(12):44–55. DOI: https://doi.org/10.58318/2957-5702-2022-12-44-55 EDN: MIDOAB

4. Ussenova Z., Abylay S., Nussupova S., Saparov A., Bogoyavlenskiy A., Alexyuk M. et al. Beta-Hemolytic Streptococcus Infection in Horses in Kazakhstan. International Journal of Veterinary Science. 2025;14(1):146–153. DOI: https://doi.org/10.47278/journal.ijvs/2024.218

5. Баянжаргал Б., Ринчинова О. Н., Цыдыпов В. Ц., Бадмаева О. Б. Эпизоотические аспекты инфекционных заболеваний на трансграничной территории России (Бурятии) и Монголии. Ветеринария Кубани. 2014;(1):10–12. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=21280515 EDN: RXRSNL

6. Бадмаева О. Б., Баянжаргал Б., Цыдыпов В. Ц. Ретроспективный анализ эпизоотического состояния по инфекционным болезням животных в Забайкалье и Монголии. Инновации и продовольственная безопасность. 2017;(4(18)):134–142. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=32319102 EDN: YMNJXL

[5]Неустроев М. П., Тарабукина Н. П., Петрова С. Г., Эльбядова Е. И., Попов А. А. Штамм бактерий Streptococcus equi, используемый для изготовления вакцины против мыта лошадей: пат. №2703485 Российская Федерация. № 2018129833: заявл. 15.08.2018; опубл. 17.10.2019. Бюл. № 29. 15 с. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet

[6]Неустроев М. П., Эльбядова Е. И., Петрова С. Г., Попов А. А. Способ специфической профилактики мыта лошадей вакциной с иммуномодулятором: пат. №2829055 Российская Федерация. № 2023131477: заявл. 01.12.2023; опубл. 23.10.2024. Бюл. № 30. 5 с. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet

[7]Неустроев М. П., Тарабукина Н. П., Эльбядова Е. И., Петрова С. Г., Попов А. А. Вакцина против мыта: Евразийский патент № 050480. № 202492690: заявл. 18.11.2024; опубл. 17.07.2025. Бюл. № 7. 3 с.
URL: https://www.eapo.org/pubservices/info/registry/inventions/patents/050480?ipType=InventionPatentCase

[8]Сертификат соответствия № СС.002054. Система добровольной сертификации «Сделано в России»: официальный сайт. [Электронный ресурс]. М., 2025. Срок действия: с 05.09.2025 по 24.08.2028. URL: https://madeinrussia.ru (дата обращения: 16.04.2026).

7. Robert N., Walzer C., Rüegg S. R., Kaczensky P., Ganbaatar O., Stauffer C. Pathologic findings in reintroduced Przewalski's horses (equus caballus przewalskii) in southwestern Mongolia. Journal of Zoo and Wildlife Medicine. 2005;36(2):273–285. DOI: https://doi.org/10.1638/03-035.1

8. Раимбеков Д. Р., Джетигенов Э. А., Карыпов К. А., Арзиев К. А. Эпизоотические особенности мыта лошадей в Чуйской области. Вестник Кыргызского национального аграрного университета им. К. И. Скрябина. 2016;(2(38)):48–52. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=26366768 EDN: WEZOYP

9. Эльбядова Е. И., Неустроев М. П. Результаты дорегистрационных исследований вакцины против мыта лошадей. Ветеринария и кормление. 2022;(2):57–60. DOI: https://doi.org/10.30917/ATT-VK-1814-9588-2022-2-16 EDN: YLSBPD

10. Pringle J., Storm E., Waller A., Riihimäki M. Influence of penicillin treatment of horses with strangles on seropositivity to Streptococcus equi ssp. equi-specific antibodies. Journal of veterinary internal medicine. 2020;34(1):294–299. DOI: https://doi.org/10.1111/jvim.15668

11. Chhabra D., Bhatia T., Goutam U., Manja A., Kumar B. Strangles in equines: An overview. Microbial Pathogenesis. 2023;178:106070. DOI: https://doi.org/10.1016/j.micpath.2023.106070

12. Waller A. S. New perspectives for the diagnosis, control, treatment, and prevention of strangles in horses. Veterinary Clinics of North America: Equine Practice. 2014;30(3):591–607. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cveq.2014.08.007

13. Duran M. C., Goehring L. S. Equine strangles: An update on disease control and prevention. Austral journal of veterinary sciences. 2021;53(1):23–31. DOI: https://doi.org/10.4067/S0719-81322021000100023

14. Livengood J. L., Lanka S., Maddox C., Tewari D. Detection and differentiation of wild-type and a vaccine strain of Streptococcus equi ssp. equi using pyrosequencing. Vaccine. 2016;34(34):3935–3937. DOI: https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2016.06.035

15. Boyle A. G., Timoney J. F., Newton J. R., Hines M. T., Waller A. S., Buchanan B. R. Streptococcus equi Infections in Horses: Guidelines for Treatment, Control, and Prevention of Strangles - Revised Consensus Statement. Journal of Veterinary Internal Medicine. 2018;32(2):633–647. DOI: https://doi.org/10.1111/jvim.15043

16. Rendle D., Bowen M., Cavalleri J., Brauwere N., Grondahl G., Maanen K., Newton J. R. Strangles vaccination: A current European perspective. Equine Veterinary Education. 2025;37(2):90–97. DOI: https://doi.org/10.1111/eve.14032

17. Robinson C., Waller A. S., Frykberg L., Flock M., Zachrisson O., Guss B., Flock J. I. Intramuscular vaccination with Strangvac is safe and induces protection against equine strangles caused by Streptococcus equi. Vaccine. 2020;38(31):4861–4868. DOI: https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2020.05.046

18. Каратаев Б. Ш., Бижанов А. Б., Намет А. М. Вакцина против мыта лошадей «Акынтай»: пат. № 31032 Республика Казахстан. 2015/0516.1: заяв. 09.04.2015; опубл. 15.04.2016. Бюл. №4. 5 с. Режим доступа: https://kz.patents.su/5-ip31032-vakcina-protiv-myta-loshadejj-akyntajj.html

19. Sansyzbay A. R., Ussenova Zh. M., Herman V., Nusupova S. T., Iancu I. Identity of isolated strains of Adenitis equi Streptococcus in Kazakhstan with European strains. Lucrari Stiintifice – Universitatea de Stiinte Agricole a Banatului Timisoara, Medicina Veterinara. 2022;55(3):83–88. URL: https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20220488029

20. Неустроев М. П., Мурашев А. Н., Бондаренко Д. А., Степанова А. М., Тарабукина Н. П. Исследование токсичности препарата Сахабактисубтил на крысах. Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. 2017;(5):59–64. DOI: https://doi.org/10.36233/0372-9311-2017-5-59-64 EDN: YSQAFR

References

1. Durham A. E., Hall Y. S., Kulp L., Underwood C. A study of the environmental survival of Streptococcus equi subspecies equi. Equine Veterinary Journal. 2018;50(6):861–864. DOI: https://doi.org/10.1111/evj.12840

2. Mitchell C., Steward K. F., Charbonneau A. R. L., Walsh S., Wilson H., Timoney J. F. et. al. Globetrotting strangles: The unbridled national and international transmission of Streptococcus equi between horses. Microbial Genomics. 2021;7(3):000528. DOI: https://doi.org/10.1099/mgen.0.000528

3. Yespembetov B. A., Sarmykova M. K., Sambetbaev A. A., Serikbay E. B., Syrym N. S., Zinina N. N., Anarbekova A. M., Tileukhanov K. K. Study of the epizootic situation of horse washing in the almaty region. *Biobezopasnost i biotekhnologiya* = Biosafety and Biotechnology. 2022;1(12):44–55. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.58318/2957-5702-2022-12-44-55

4. Ussenova Z., Abylay S., Nussupova S., Saparov A., Bogoyavlenskiy A., Alexyuk M. et al. Beta-Hemolytic Streptococcus Infection in Horses in Kazakhstan. International Journal of Veterinary Science. 2025;14(1):146–153. DOI: https://doi.org/10.47278/journal.ijvs/2024.218

5. Bayanzhargal B., Rinchinova O. N., Tsidipov V. Ts., Badmayeva O. B. Epizootologic aspects of infectious diseases an the transboundary territories of the Russian Federation (Buryatia) and Mongolia. *Veterinariya Kubani*. 2014;(1):10–12. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=21280515

6. Badmayeva O. B., Bayanzhargal B., Tsidipov V. Ts. A retrospective analysis of the epizootic situation on infectious diseases of animals in Transbaikalia and Mongolia. *Innovatsii i prodovolstvennaya bezopasnost* = Innovations and Food Safety. 2017;(4(18)):134–142. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=32319102

7. Robert N., Walzer C., Rüegg S. R., Kaczensky P., Ganbaatar O., Stauffer C. Pathologic findings in reintroduced Przewalski's horses (equus caballus przewalskii) in southwestern Mongolia. Journal of Zoo and Wildlife Medicine. 2005;36(2):273–285. DOI: https://doi.org/10.1638/03-035.1

8. Raimbekov D. R., Dzhetigenov E. A., Karipov K. A., Arziyev K. A. Epizootology features strangles horse in Chui oblast. *Vestnik Kirgizskogo natsionalnogo agrarnogo universiteta im. K. I. Skryabina*. 2016;(2(38)):48–52. (In Kyrgyzstan). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=26366768

9. Elbyadova E. I., Neustroyev M. P. Results of pre-registration studies of the vaccine against strangles of horses. *Veterinariya i kormleniye*. 2022;(2):57–60. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30917/ATT-VK-1814-9588-2022-2-16

10. Pringle J., Storm E., Waller A., Riihimäki M. Influence of penicillin treatment of horses with strangles on sero-positivity to Streptococcus equi ssp. equi-specific antibodies. Journal of veterinary internal medicine. 2020;34(1):294 –299. DOI: https://doi.org/10.1111/jvim.15668

11. Chhabra D., Bhatia T., Goutam U., Manja A., Kumar B. Strangles in equines: An overview. Microbial Pathogenesis. 2023;178:106070. DOI: https://doi.org/10.1016/j.micpath.2023.106070

12. Waller A. S. New perspectives for the diagnosis, control, treatment, and prevention of strangles in horses. Veterinary Clinics of North America: Equine Practice. 2014;30(3):591–607. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cveq.2014.08.007

13. Duran M. C., Goehring L. S. Equine strangles: An update on disease control and prevention. Austral journal of veterinary sciences. 2021;53(1):23–31. DOI: https://doi.org/10.4067/S0719-81322021000100023

14. Livengood J. L., Lanka S., Maddox C., Tewari D. Detection and differentiation of wild-type and a vaccine strain of Streptococcus equi ssp. equi using pyrosequencing. Vaccine. 2016;34(34):3935–3937. DOI: https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2016.06.035

15. Boyle A. G., Timoney J. F., Newton J. R., Hines M. T., Waller A. S., Buchanan B. R. Streptococcus equi Infections in Horses: Guidelines for Treatment, Control, and Prevention of Strangles - Revised Consensus Statement. Journal of Veterinary Internal Medicine. 2018;32(2):633–647. DOI: https://doi.org/10.1111/jvim.15043

16. Rendle D., Bowen M., Cavalleri J., Brauwere N., Grondahl G., Maanen K., Newton J. R. Strangles vaccination: A current European perspective. Equine Veterinary Education. 2025;37(2):90–97. DOI: https://doi.org/10.1111/eve.14032

17. Robinson C., Waller A. S., Frykberg L., Flock M., Zachrisson O., Guss B., Flock J. I. Intramuscular vaccination with Strangvac is safe and induces protection against equine strangles caused by Streptococcus equi. Vaccine. 2020;38(31):4861–4868. DOI: https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2020.05.046

18. Karatayev B. Sh., Bizhanov A. B., Namet A. M. "Akyntai" vaccine against horse strangles: Patent no. 31032, Republic of Kazakhstan. 2016. URL: https://kz.patents.su/5-ip31032-vakcina-protiv-myta-loshadejj-akyntajj.html

19. Sansyzbay A. R., Ussenova Zh. M., Herman V., Nusupova S. T., Iancu I. Identity of isolated strains of Adenitis equi Streptococcus in Kazakhstan with European strains. Lucrari Stiintifice – Universitatea de Stiinte Agricole a Banatului Timisoara, Medicina Veterinara. 2022;55(3):83–88. URL: https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20220488029

20. Neustroyev M. P., Murashev A. N., Bondarenko D. A., Stepanova A. M., Tarabukina N. P. Study of toxicity of Sakhabactisubtil in rats. *Zhurnal mikrobiologii, epidemiologii i immunobiologii* = Journal of Microbiology, Epidemiology and Immunobiology. 2017;(5):59–64. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.36233/0372-9311-2017-5-59-64

Вклад авторов: Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Сведения об авторах

Неустроев Михаил Петрович, доктор вет. наук, профессор, зам. директора по науке, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией ветеринарной биотехнологии, Якутский научно-исследовательский институт сельского хозяйства им. М. Г. Сафронова – обособленное подразделение ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», ул. Бестужева-Марлинского д. 23, корп. 1, г. Якутск, Российская Федерация, 677001, e-mail: agronii@mail.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0672-4109

✉ **Эльбядова Евдокия Игнатьевна**, кандидат вет. наук, научный сотрудник лаборатории ветеринарной биотехнологии, Якутский научно-исследовательский институт сельского хозяйства им. М. Г. Сафронова – обособленное подразделение ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», ул. Бестужева-Марлинского д. 23, корп. 1, г. Якутск, Российская Федерация, 677001, e-mail: agronii@mail.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7018-7411**, e-mail: elbyadova@bk.ru

Author contributions: All authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Information about the authors

Mikhail P. Neustroev, DSc in Veterinary, professor, Deputy Director for Science, chief researcher, Head of the Laboratory of Veterinary Biotechnology, M. G. Safronov Yakut Scientific Research Institute of Agriculture – separate division Federal Research Centre «The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», 23 Bestuzhev-Marlinsky str., building 1, Yakutsk, Russian Federation, 677001, e-mail: agronii@mail.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0672-4109

✉ **Evdokia I. Elbyadova**, PhD in Veterinary, researcher, the Laboratory of Veterinary Biotechnology, M. G. Safronov Yakut Scientific Research Institute of Agriculture – separate division Federal Research Centre «The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences», 23 Bestuzhev-Marlinsky str., building 1, Yakutsk, Russian Federation, 677001, e-mail: agronii@mail.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7018-7411**, e-mail: elbyadova@bk.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

ЗВЕРОВОДСТВО. ОХОТОВЕДЕНИЕ/ FUR FARMING AND HUNTING

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.467–479
УДК 639.125.3

Ресурсы рябчика и их использование в Кировской области: история и современность

© 2026. Б. Е. Зарубин[1], В. В. Колесников[1], А. В. Экономов[1]✉, А. В. Козлова[1], В. В. Степанов[1], М. А. Перевозчикова[1], А. Ю. Просеков[2], Е. А. Вечтомова[2], В. Н. Пиминов[1], Д. П. Стрельников[1]

[1]*ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б. М. Житкова», г. Киров, Российская Федерация*
[2]*ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», г. Кемерово, Российская Федерация*

Рябчик* (*Tetrastes bonasia* L., 1758) – *представитель семейства фазановых, населяющий лесную зону Евразии. Широкое распространение, относительная простота добычи, доступность для широкого круга охотников определяют популярность вида и его значимость в хозяйственном отношении. История освоения ресурсов рябчика включает как массовые заготовки птиц, так и их добычу в рамках любительской охоты. В настоящее время в Западной Европе вид находится под угрозой исчезновения. В Кировской области рябчик – ценный охотничий ресурс. Численность птиц на территории региона (151,83 тыс. особей) оценена на основе данных государственного мониторинга. В качестве альтернативного подхода в определении ресурсного потенциала рябчика (821,20 тыс. особей) в границах субъекта использованы материалы Службы «урожая» Всероссийского научно-исследовательского института охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б. М. Житкова. Расхождения в оценках превышают 5 раз и дополняются различиями в тенденциях многолетних изменений численности вида в регионе. Определена доля ресурсов рябчика Кировской области в масштабе страны. Сведения об уровне использования популяции птиц представлены на основе двух источников. Отмечается шестикратное расхождение в оценках добычи вида. Категории продукции при эксплуатации ресурсов рябчика не многочисленны. Основной мотивацией добычи птиц является получение мясной продукции. Общий объем мясной продукции рябчика в Кировской области составляет 19424 кг на сумму 52 734 800,50 рублей. Охота на рябчика на территории Кировской области разрешена в течение 6,5 месяцев – с третьей субботы августа по 28 (29) февраля. Рябчик попутно добывается во время охотничьих туров, связанных с охотой на другие виды. Незначительная доля птиц используется таксидермистами области для изготовления чучел.

Ключевые слова: *добыча, мясная продукция, охотничий туризм, таксидермическая продукция*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б.М. Житкова» (тема № FNWS-2025-0001).

Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Зарубин Б. Е., Колесников В. В., Экономов А. В., Козлова А. В., Степанов В. В., Перевозчикова М. А., Просеков А. Ю., Вечтомова Е. А., Пиминов В. Н., Стрельников Д. П. Ресурсы рябчика и их использование в Кировской области: история и современность. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):467–479.
DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.467-479

Поступила в редакцию: 07.05.2025 Принята к публикации: 20.04.2026
Доработана после рецензирования: 11.09.2025 Опубликована онлайн: 27.04.2026

Status and use of hazel grouse resources in the Kirov region, Russia: history and modernity

© 2026. Boris E. Zarubin[1], Vyacheslav V. Kolesnikov[1], Aleksandr V. Ekonomov[1] ✉, Anna V. Kozlova[1], Valery V. Stepanov[1], Maria A. Perevozchikova[1], Aleksandr Yu. Prosekov[2], Elena A. Vechtomova[2], Vladimir N. Piminov[1], Dmitriy P. Strelnikov[1]

[1]*Professor Zhitkov Federal State Budgetary Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming, Kirov, Russian Federation,*
[2]*Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation*

Hazel (Tetrastes bonasia* L., *1758) grouse is a member of the Phasianidae family, native to forest zone of Eurasia. Its widespread distribution, relative simplicity and accessibility of hunting determine its popularity among hunters and economic importance. The history of hazel grouse resource use includes both mass procurement and recreational hunting. Currently, hazel grouse is endangered in Western Europe. In the Kirov region, hazel grouse is a valuable hunting resource. The bird number in the region (151.83 thousand individuals) is estimated based on state monitoring data. As an alternative approach to determining the hazel grouse (821.20 thousand individuals) in the region, the materials of the "Harvest Service" of the Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming were used. Fivefold discrepancies in the estimates are complemented by differences in the trends of long-term dynamics of the species population. The share of hazel grouse resources from the Kirov region on a national scale is determined. The estimates of bird population utilization are presented based on two sources. A sixfold discrepancy in estimates of hazel grouse harvest is noted. Product categories in the exploitation of hazel grouse resources are not numerous. The main motivation for hazel grouse hunting is meat production. The total volume of hazel grouse meat production in the Kirov Region is 19,424 kg worth 52,734,800.50 rubles. Hazel grouse hunting in the Kirov Region is permitted for 6.5 months long from the third Saturday of August to 28 (29) February. Hazel grouse is also harvested during hunting tours associated with hunting other species. A small proportion of birds is used by taxidermists in the region to make stuffed specimens.

Keywords: *production, meat products, hunting tourism, taxidermy products*

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Professor Zhitkov Federal State Budgetary Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming (theme No. FNWS-2025-0001).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors stated no conflict of interest.

For citation: Zarubin B. E., Kolesnikov V. V., Ekonomov A. V., Kozlova A. V., Stepanov V. V., Perevozchikova M. A., Prosekov A. Yu., Vechtomova E. A., Piminov V. N., Strelnikov D. P. Status and use of hazel grouse resources in the Kirov region, Russia: history and modernity. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):467–479. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.467-479

Received: 07.05.2025
Revised: 11.09.2025
Accepted for publication: 20.04.2026
Published online: 27.04.2026

Рябчик (*Tetrastes bonasia* L., 1758) – вид отряда курообразных, находящийся под угрозой исчезновения на территории Западной Европы и представляющий большой интерес для сохранения [1, 2]. Европейский атлас гнездящихся птиц 2 (*European Breeding Bird Atlas 2*) свидетельствует о большом и практически непрерывном ареале данного вида по бореальным лесам с самой высокой концентрацией его в Южной Финляндии и России, где подходящая среда обитания преобладает на больших, нефрагментированных территориях хвойных и смешанных лесов [3, 4, 5, 6]. В основном ареале от Финляндии, через страны Балтии в направлении Беларуси и России наблюдается мало изменений[1] [7, 8, 9]. Однако в более фрагментированном ареале Центральной и Западной Европы имеется значительное количество участков, где вид в настоящее время не подтвержден [10, 11].

На протяжении многих десятилетий рябчик является одним из наиболее массовых объектов охоты в России[2] [12, 13, 14]. На территории Кировской области рябчик – обычный широко распространённый гнездящийся оседлый вид, населяющий всю территорию области. Лидирующие позиции в хозяйственном использовании вида определялись рядом факторов: высокой численностью вида; обширностью ареала; массовостью сельского населения, ведущего промысел (добычу, заготовки); дефицитом свободных денежных средств в сельской местности [14, 15].

[1]Атлас гнездящихся птиц европейской части России. Ред.-сост. М. В. Калякин, О. В. Волцит. М.: Фитон XXI, 2020. 908 с.
[2]Голубева О. Н., Каледин А. П., Белкин О. Е., Остапчук А. М. Охотничьи ресурсы Калининградской области. Ресурсы дичи и рыбы: использование и воспроизводство: мат-лы IV Всеросс. (национальной) научн.-практ. конф. Красноярск: Красноярский ГАУ, 2023. С. 44–51. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=59457264&pff=1 EDN: WKLCYB

В советский период массовую заготовку дичи поддерживала система потребкооперации, которая имела широкие материальные возможности и развитую сеть заготовительных организаций. Объем заготовок рябчика на территории Европейского Севера, включая Кировскую область, составлял до 500 тыс. особей[3].

В XXI веке произошли изменения в хозяйственном значении, общей популярности охоты на рябчика. В рейтинге популярности охота на рябчика в России поднялась с 10-го в 2011 г. на 6-е место в 2021 г. По Приволжскому федеральному округу – с 9-го места в 2011 г. на 5-е – в 2021 г. [16]. Максимальных позиций рейтинг популярности этого вида достиг в Вологодской (2-е место) и Архангельской (3-е место) областях [17].

В 2011 г. в рейтинге хозяйственного значения вида охота на рябчика характеризовалась следующими показателями: в России – 13-е место, в Приволжском федеральном округе – 12-е место, в Кировской области – 10-е место. Наивысшие показатели данного рейтинга сохраняются в Северо-Западном федеральном округе [17]. В 2021 г. аналогичный опрос показал снижение хозяйственного значения охоты на рябчика – 15-е место по России. В Приволжском федеральном округе значение вида осталось на прежнем 12-м месте [16].

Цель исследований – оценка хозяйственного использования ресурсов рябчика на территории Кировской области.

Для ее решения поставлены следующие задачи:

1. Оценить ресурсы и добычу рябчика.
2. Выявить объем мясной продукции.
3. Провести анализ услуг по организации охоты.
4. Определить размер оборота вида в таксидермических изделиях.

Научная новизна – впервые в масштабах региона произведена оценка выхода и размеров производства мясной продукции рябчика. Определен физико-химический состав мясной продукции.

Материал и методы. Оценка ресурсов рябчика опирается на данные Службы «урожая» ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б. М. Житкова» (далее – Служба «урожая» ВНИИОЗ) и сведения государственного мониторинга[4] [18].

Популярность охоты и хозяйственное значение вида оценивали по результатам опросов Службы «урожая» ВНИИОЗ в 2011 и 2021 гг.

Объем добычи рябчика определяли по данным государственного мониторинга[5]. В качестве альтернативной оценки использовали анкетный опрос охотников Кировской области в 2015–2017 гг. Опросом охвачено 69,40 % территории области (25 из 40 районов), 67,06 % охотничьих угодий региона. Разослано 499 анкет. Возврат составил 37,90 %.

Для оценки уровня добычи рябчика в весенний сезон охоты в 2015–2017 гг. использовали метод анонимного опроса охотников (n = 216).

Взвешивание добытых птиц (n = 158) и мясных тушек (n = 155) проводили на электронных весах Garin DS2 (Китай) с точностью до 1 г не позднее 6 часов с момента добычи.

Стоимостная оценка мясной продукции рассчитана на основе информации с электронного ресурса «Дикоед»[6].

Информация по охотничьему туризму за 2023 г. собрана на основе анализа деятельности электронного ресурса Gethunt, который представляет собой сервис для бронирования охот в различных регионах России[7].

Объемы использования сырья, популярность таксидермических изделий, стоимость готовой продукции определяли на основе опроса специализированных мастерских (n = 11).

Статистический анализ проводили с использованием программного обеспечения MS Excel (Office 2019) и Statgraphics (19-X64) общепринятыми методами[8].

[3]Гайдар А. А., Романов А. Н. Промысел рябчика и его воздействие на половой состав популяции. Мат-лы научн. конф., посвящ. 50-летию института. Тез. докл. Ч. II. Вопросы экологии. Киров: ВНИИОЗ, 1972. С. 135–137.
[4]Региональные доклады «О состоянии окружающей среды Кировской области в 2000-2021 гг.». [Электронный ресурс]. URL: https://www.kirovreg.ru/econom/ecology/doklad.php (дата обращения: 10.04.2025).
[5]Там же.
[6]Каталог мяса и натуральной мясной продукции из диких животных. Дикоед – официальный сайт, 2024. [Электронный ресурс]. URL: https://dikoed.ru/catalog (дата обращения: 15.12.2024).
[7]Gethunt – успешные охоты – официальный сайт. ООО «Гетхант», 2024. [Электронный ресурс]. URL: https://gethunt.ru (дата обращения: 15.12.2024).
[8]Ивантер Э. В., Коросов А. В. Элементарная биометрия: учебное пособие. 3-е изд. и доп. Петрозаводск: ПетрГУ, 2010. 104 с. URL: https://korosov.narod.ru/126.pdf

Результаты и их обсуждение. *Ресурсы.* Рябчик – широко распространенный и многочисленный представитель боровой дичи лесной зоны России. Оценка его ресурсов выполняется методом зимнего маршрутного учета[9].

Оценки численности Службы «урожая» ВНИИОЗ базируются на результатах ежегодных опросов охотников-респондентов [18]. Различия в оценках ресурсов составляют от 200 до 500 % (рис. 1).

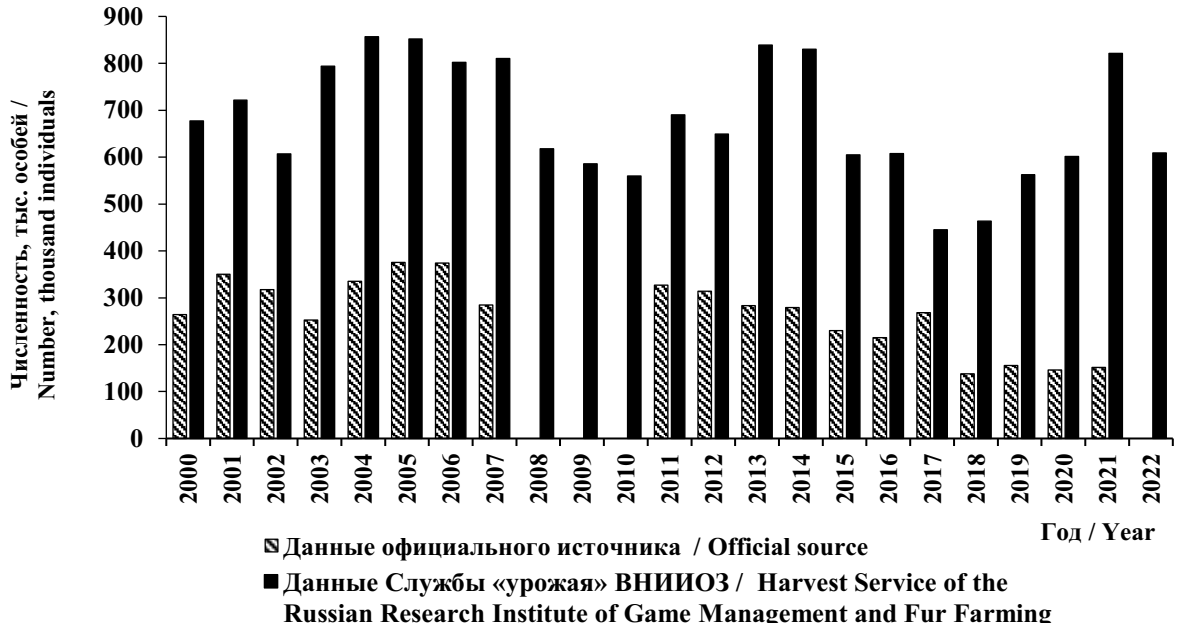


Рис. 1. **Сравнительные показатели численности рябчика в Кировской области по данным Госохотучета и Службы «урожая» ВНИИОЗ /**

Fig. 1. **Comparative indicators of the number of hazel grouse in the Kirov region according to state hunting records and Harvest Service of the Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming**

Современные ресурсы рябчика (2021 г.) в регионе по разным оценкам составляют от 151,83 до 821,20 тысяч особей[10] [16]. Получаемая разными способами информация значительно различается не только по абсолютным показателям, но и по тенденциям многолетних изменений численности вида в регионе.

Основным обладателем запасов рябчика в стране является Сибирский федеральный округ, на долю которого в разные годы приходится от 26,40 до 40,40 % ресурсов этого вида (рис. 2).

В Приволжском федеральном округе сосредоточено приблизительно 5,50 % общероссийских ресурсов вида, а на долю Кировской области приходится чуть более 1 % рябчиков [16].

Поскольку рябчик находится под угрозой исчезновения по всей Западной Европе, М. Лизер (M. Lieser, 2018) [2] пришел к выводу, что во многих частях европейского ареала, особенно в лесах центральной части, у этого вида нет шансов выжить. Большие площади лесов не заселены видом, оставшиеся популяции переоценены по размеру и не имеют перспектив из-за современного масштабного развития лесного хозяйства. Колонизация видом новых местообитаний невозможна, поскольку нет исходных популяций, планы по сохранению вида в прошлом не реализованы.

С. Клаус, Т. Людвиг (S. Klaus, T. Ludwig, 2021) [10] исследовали долгосрочную динамику популяции центральноевропейского рябчика на территории Чешской Республики. Отмечена стабильность популяции более 30 лет до 2006 г., а далее наметилась тенденция к снижению. Причины вызваны развитием лесного хозяйства.

[9]О состоянии окружающей среды Кировской области в 2022 году: Региональный доклад. Под общ. ред. Т. Э. Абашева. Киров: Министерство охраны окружающей среды, 2023. 201 с. URL: https://www.kirovreg.ru/econom/ecology/%D0%A0%D0%B5%D0%B3%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%202022.pdf

[10]Там же.

Использование шумных машин, появление сплошных рубок на значительных площадях, расширение дорожной сети способствуют росту фактора беспокойства и сокращению мест обитания. На фоне масштабных лесозаготовок остается высоким влияние хищников, а также туристическая активность в местах обитания. Рекомендации по управлению популяциями вида, занесенного в Красную книгу, включают расширение основной зоны национальных парков и снижение интенсивности лесного хозяйства.

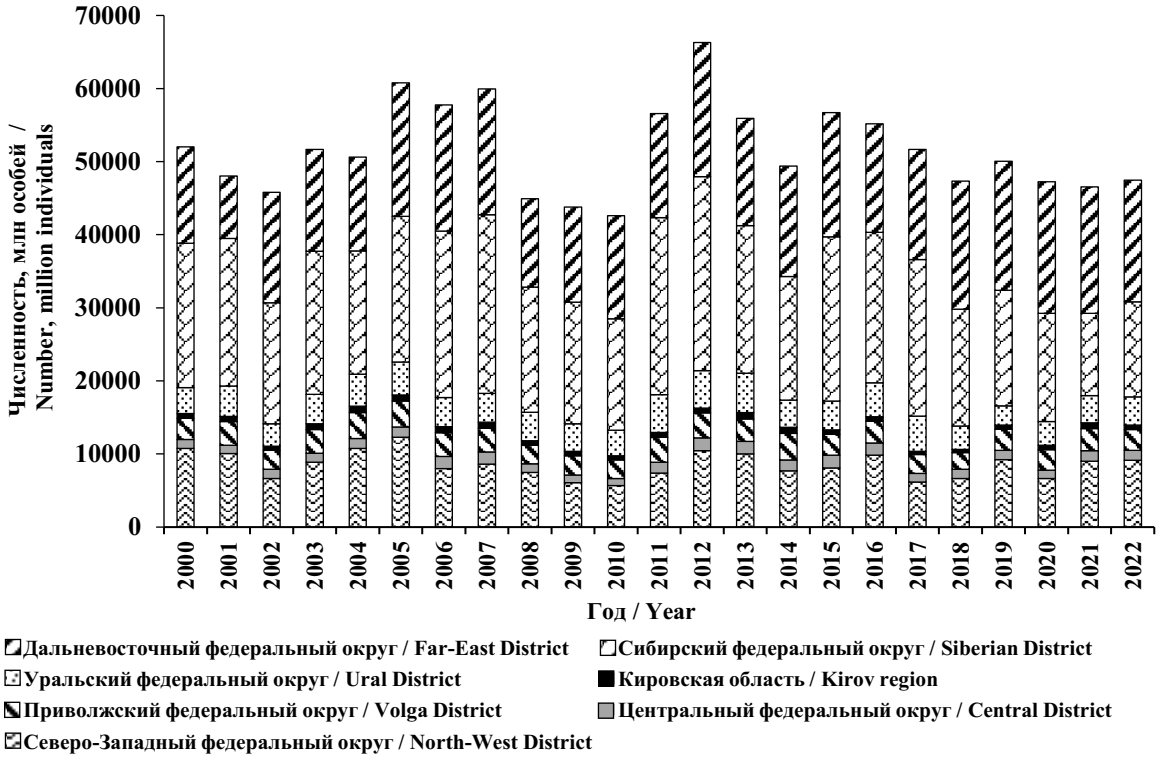


Рис. 2. **Динамика численности рябчика в России [11] /**
Fig. 2. **Dynamics of the hazel grouse population in Russia [11]**

Исследование М. Матысек с соавторами (M. Matysek et al., 2020) [19] показало, что важными факторами качества среды обитания рябчика являются не только расстояние от туристических маршрутов, но и количество туристов. Отдых населения на открытом воздухе в охраняемых районах – серьезная проблема для сохранения природы, способная привести к сокращению популяции исчезающих видов [20]. Таким образом, для эффективной защиты птиц, гнездящихся на земле, ограничивают движение туристов по туристическим маршрутам через основные места размножения. Рекомендуется более низкая плотность туристических маршрутов в местах размножения, имеющих большое значение для сохранения природы.

А. Фанелли с соавторами (A. Fanelli et al., 2021) [1] указывают, что одним из факторов, отрицательно влияющих на динамику популяции этих курообразных, являются желудочно-кишечные паразиты.

Для таежной зоны России лимитирующими факторами динамики численности рябчика являются погодные условия в течение года [21]. В полной мере это характерно и для Кировской области.

Объем добычи. До 1915 г. добыча рябчика в России оценивалась в 7 млн особей [22]. Средние показатели добычи составляли 5,6 млн особей, а объемы экспорта составляли до 2,3 млн особей [23]. Наибольшую долю в заготовках боровой дичи советского периода занимал рябчик[11].

По данным Службы «урожая» ВНИИОЗ, с середины 50-х годов XX века на территории Кировской области происходит неуклонное снижение объема добычи (рис. 3).

[11]Гайдар А. А., Романов А. Н. Указ. соч.

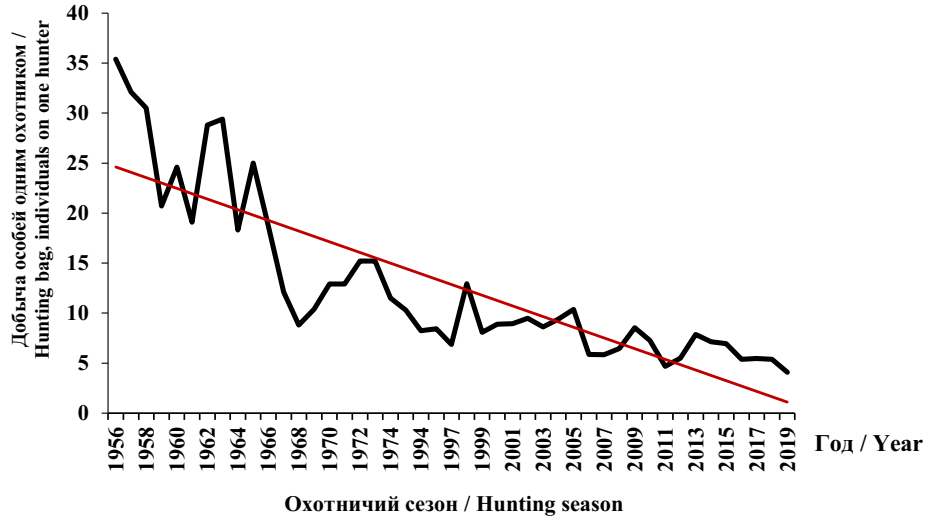


Рис. 3. **Средний годовой размер добычи рябчика на одного охотника, из числа добывавших в Кировской области /**

Fig. 3. **Average annual size of hazel grouse harvest per a hunter in the Kirov region**

Одной из значимых причин сокращения объемов добычи вида стало многократное снижение доли сельского населения, осуществляющего основное использование ресурсов. Так, на территории Кировской области доля сельского населения в 1950 г. составляла 74,80 %, в 1980 г. – 35,20 %, в 2020 г. – 22,20 %[12].

Современные официальные сведения использования ресурсов рябчика в регионе свидетельствуют о ежегодной добыче 1112–14766 птиц (рис. 4).

В качестве альтернативной оценки освоения ресурсов вида в Кировской области Службой «урожая» ВНИИОЗ в 2015–2017 гг. проведен анонимный опрос охотников. Результаты опроса показали, что в период весенней охоты птиц незаконно добывают 5,20 % охотников, при этом на их долю приходится 2,20 % (1947 особей) годового объема добычи. В осенне-зимний сезон добыча рябчика составляет 86000 особей. Таким образом, общий годовой объем добычи составляет не менее 87947 птиц, что в 6 раз превышает сведения из официальных источников.

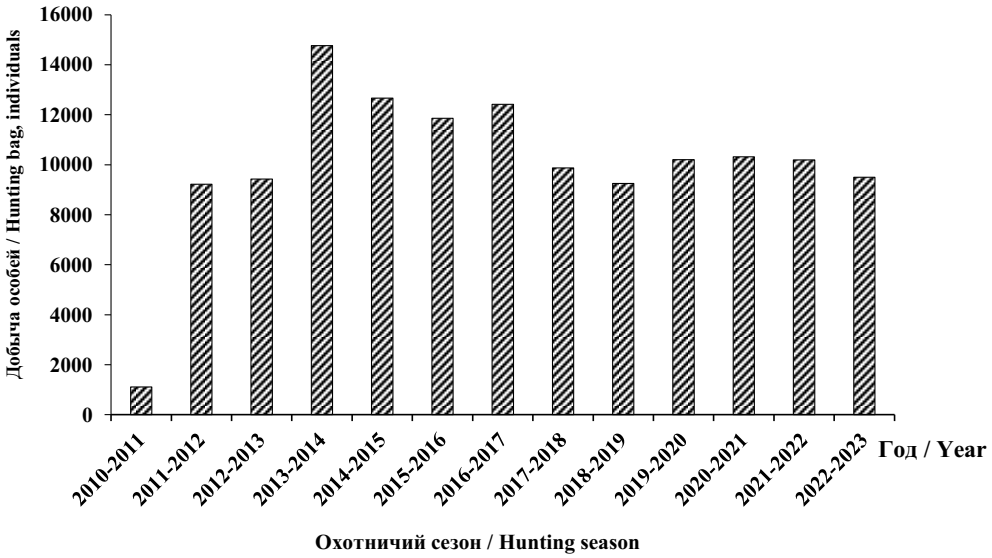


Рис. 4. **Динамика добычи рябчика в Кировской области (данные госмониторинга 2010–2023 гг.) /**
Fig. 4. **Dynamics of hazel grouse production in the Kirov region (state monitoring data for 2010–2023)**

[12]Кировская область в цифрах: краткий статистический сборник. Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Кировской области. Киров, 2022. 114 с.
URL: https://43.rosstat.gov.ru/news_resp/document/166890

Продукция. Категории продукции, получаемые при охоте на рябчика, немногочисленны. Основной из них является мясная. В отдельных случаях вид добывается в рамках охотничьего туризма, а также используется как объект таксидермии.

Мясная продукция. В масштабах обширного ареала вида отмечены различия в весовых показателях тушек рябчика (табл. 1).

Таблица 1 – **Масса тела рябчика в осенне-зимний период /**
Table 1 – **Body weight of hazel grouse in autumn-winter period**

Регион / Region	*Убойный вес тушки, г / Slaughter weight of carcass, g*	*Источник / Source*
Кировская область / Kirov region	379,50	[24]
Европейский север / European North	382,30	[25]
Восточно-европейский / Eastern European	342,50	[23]
Приуралье / Urals	396,00	
Западная Сибирь / Western Siberia	410,00	
Томская область / Tomsk region	396,00	
Восточная Сибирь / Eastern Siberia	420,00	
Красноярский край / Krasnoyarsk Krai	356,50	
Беловежская Пуща / Belovezhskaya Pushcha	369,40	[26]

Согласно Приказу Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 477 от 24.07.2020 г. (с изменениями на 28 марта 2024 г.)[13] охота на рябчика весной запрещена. Приведенные параметры относятся к особям, добытым в осенне-зимний период.

В летне-осенний период происходит активный рост массы птиц. В августе вес тушки составляет 302,10 г, в ноябре – 382,60 г [23]. Отмечены различия в упитанности птиц в течение рассматриваемого периода. В августе 100 % птиц не имеют жировых запасов. Доля особей с наивысшими показателями упитанности (68,90 %) приходится на октябрь и незначительно снижается в ноябре (66,00 %) [23].

Среднегодовые весовые показатели рябчиков являются расчетными, так как получены путем сложения двух сезонных выборок и могут использоваться для предварительных оценок объемов продукции. Фактические среднегодовые показатели можно рассчитать по каждому сезону конкретного года (табл. 2).

Таблица 2 – **Мясная продуктивность рябчика в Кировской области /**
Table 2 – **Meat productivity of hazel grouse in the Kirov region**

Показатель / Indicator	*n*	*M±m*	*Lim*	*б*
Весенний сезон / Spring season				
Масса тела, г / Body weight, g	37	349,24±2,83	320,00–390,00	16,96
Масса мясной туши, г / Weight of meat carcass, g	36	222,53±17,98	190,00–260,00	17,98
Мясная продуктивность, % / Meat productivity, %	36	63,93 ±0,71	56,16–72,22	4,21
Осенне-зимний сезон / Autumn-winter season				
Масса тела, г / Body weight, g	121	374,90±2,45*	285,00–465,00	26,81
Масса мясной туши, г / Weight of meat carcass, g	119	220,83±21,57	170,00–280,00	21,57
Мясная продуктивность, % / Meat productivity, %	119	59,00±0,49*	45,16–74,28	5,30
Среднее значение / Average values				
Масса тела, г / Body weight, g	158	368,90±2,16	285,00–465,00	27,10
Масса мясной туши, г / Weight of meat carcass, g	155	221,20±1,67	170,00–280,00	20,75
Мясная продуктивность, % / Meat productivity, %	155	60,10±0,44	45,20–74,30	5,46

* Различия достоверны между весенним и осенне-зимним сезоном добычи при $p<0,05$ /
* Differences in body weight are significant between spring and autumn-winter season catch at $p<0.05$

[13]Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации № 477 от 24.07.2020 г. (с изменениями на 28 марта 2024 г.). [Электронный ресурс]. URL: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=504441 (дата обращения: 15.12.2024).

В Кировской области оборот мясной продукции рябчика на внутреннем рынке региона не выявлен. Одним из основных заготовителей мяса рябчика на территории европейской части России является ООО «Любо», организующее закупку под брендом «Дикоед»[14]. В охотничьем сезоне 2023-2024 гг. цена за мясную тушку составляла 500–700 руб., в среднем по 2714,93 руб. за 1 кг.

Расчет объемов мясной продукции в денежном эквиваленте произведен на основе информации Службы «урожая» ВНИИОЗ, исследований мясной продуктивности рябчика и данных о закупочной цене мяса рябчика ООО «Любо».

В таблице 3 представлены результаты расчета годового объема производства мяса рябчика и денежный эквивалент этой продукции в Кировской области. Современная добыча птиц находится примерно на одном уровне в сравнении с 2015 г.

Таблица 3 – **Оценка объемов и стоимости годового объема мясной продукции от охоты на рябчика в Кировской области /**
Table 3 – **Estimation of the volume and cost of annual meat production from hazel grouse hunting in the Kirov region**

Показатель / Indicator	*Весенний сезон / Spring season*	*Осенне-зимний сезон / Autumn-winter season*	*За год / In a year*
Добыто, особей / Catch, individuals	1947	86000	87947
Масса 1 тушки, г / Weight of 1 carcass, g	222,53	220,83	251,25
Цена, руб. / Price, rubles:			
за 1 мясную тушку / per 1 meat carcass	600,00	600,00	600,00
за 1 кг / per 1 kg	2714,93	2714,93	2714,93
Общая масса мясной продукции, кг / Total weight of meat products, kg	433	18991	19424
Стоимость продукции, руб. / Cost of products, rubles	1 175 564,70	51 559 235,63	52 734 800,50

Охотничий туризм. Согласно Указу Губернатора Кировской области от 30.05.2022 № 11 «Об определении видов разрешенной охоты и ограничений охоты в охотничьих угодьях на территории Кировской области»[15], охота на рябчика на территории Кировской области разрешена с третьей субботы августа по 28 (29) февраля. Продолжительность сезона охоты составляет 6,5 месяцев.

Анализ иностранного охотничьего туризма в регионе в начале XXI века не выявил спроса в охоте на рябчика среди иностранных охотников [27]. Единичная добыча птиц осуществляется попутно во время охотничьих туров по другим видам охотничьих ресурсов. Целевые услуги по организации и проведению охот на рябчика не востребованы. Сведений о размерах добычи рябчика иностранными охотниками нет.

Анализ продаж охот на внутреннем рынке России в 2023 г. выполнен с помощью площадки Gethunt[16], который показал, что целенаправленно охотой на рябчика интересуется 0,36 % охотников. Средняя стоимость организации охот составляет 5000 руб. с человека в день. В организацию охоты включены разрешительные документы, сопровождение егеря, транспортное обслуживание, трофеи и их первичная обработка. Дополнительно оплачивается проживание и питание.

Согласно прейскуранту двух охотничьих хозяйств Тверской области, добытая птица оплачивается отдельно в размере 500 руб.[17]. Продаж охот на рябчика в данных хозяйствах не зафиксировано.

Низкий уровень спроса характерен в отношении целевых охот на рябчика. При этом 17 % охотников добывают вид попутно преимущественно во время охот на зайца и лисицу с гончими. В этом случае расходы охотника связаны с приобретением дополнительных разрешительных документов на добычу птиц.

[14]URL: https://dikoed.ru/catalog
[15]Указ Губернатора Кировской области от 30.05.2022 № 11 «Об определении видов разрешенной охоты и ограничений охоты в охотничьих угодьях на территории Кировской области». [Электронный ресурс]. URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/4300202205310005 (дата обращения: 15.12.2024).
[16]URL: https://gethunt.ru
[17]URL: https://dikoed.ru/catalog

Несмотря на широкий ареал и значительную продолжительность сезона охоты, добыча птиц в рамках целевых охотничьих туров для иностранных охотников не востребована. Организация охот на внутреннем рынке характеризуется низким уровнем популярности. В Кировской области услуги организации охоты на рябчика вовсе не пользуются спросом.

Трофейно-таксидермическая продукция. Рябчик не входит в перечень трофейных видов охотничьих животных [28].

По популярности изготовления у таксидермистов чучела рябчиков находятся на 15-м месте, при этом только 40 % из них готовы работать с этим видом. Невысокая популярность изготовления чучел таксидермическими мастерскими обусловлена низким уровнем спроса на чучела данного вида. Стоимость чучел рябчика варьирует от 3000 до 6000 руб. Средняя цена за одно изделие составляет 5000 руб. Чучела рябчика ограниченно используются в композициях преимущественно с чучелами рыси и куницы. Стоимость композиции «охота куницы на рябчика» составляет 10000–15000 руб.; «охота рыси на рябчика» – 60000–100000 руб.

Общее количество чучел рябчика с учетом композиций на рынке таксидермических изделий области определить затруднительно. По нашей экспертной оценке, их число не превышает трех десятков в год на общую сумму не более 300 000 руб.

Заключение. Рябчик является одним из наиболее массовых видов охотничьих ресурсов Кировской области. Современная численность птиц на территории региона по разным оценкам составляет от 151,80 до 821,20 тыс. особей. На долю области приходится чуть более 1 % общероссийских ресурсов рябчика.

Лидирующие позиции рябчика в добыче в сравнении с другими представителями боровой дичи обусловлены широким распространением вида, обилием его ресурсов, эффективностью самоловных способов добычи. Основной категорией охотников, добывающих вид, являются сельские жители. С середины XX века в Кировской области наблюдается снижение объема добычи. Одна из ключевых причин – снижение доли сельского населения в регионе с 74,80 % в 1950 г. до 22,20 % в 2020 г.

Современная официальная добыча вида в регионе находится на уровне 14766 особей. Альтернативные методы оценки ВНИИОЗ свидетельствуют о ежегодной добыче 87947 особей при этом 2,20 % годового объема добывается в закрытый для охоты на вид весенний период. Различия методов оценки составляют 6 раз.

Ключевым видом продукции, получаемым при охоте на рябчика, является мясная. Общий годовой объем добываемого в регионе мяса рябчика равен 19424 кг. На внутреннем рынке области оборот мясной продукции вида не выявлен. Одним из основных заготовителей мяса рябчика на территории европейской части России является ООО «Любо». В охотничьем сезоне 2023-2024 гг. цена за мясную тушку составляла 500–700 руб., в среднем по 2714,93 руб. за 1 кг. Стоимость мясной продукции, добываемой в регионе, может быть оценена в 52734800,50 руб.

Рябчик не востребован как объект охотничьего туризма для иностранных охотников. Добыча птиц в рамках целевых охотничьих туров осуществляется попутно. На внутреннем рынке России целенаправленно охотой на рябчика интересуется 0,36 % охотников. При этом средняя стоимость организации охот составляет 5000 руб. с человека в день. Услуги по организации охоты на рябчика в Кировской области не пользуются спросом. Их объем и доля в сравнении с другими видами охот не выявлены.

Отсутствие рябчика в перечне видов трофейных животных России во многом определяет низкий уровень популярности изготовления его чучел в охотничьей среде. В связи с этим лишь 40 % таксидермических студий Кировской области изготавливают чучела птиц. Ограниченно вид используется в композициях совместно с чучелами рыси и куницы. Общий годовой объем оборота таксидермических изделий вида с учетом композиций на региональном рынке не превышает 300 000 руб.

Список литературы

1. Fanelli A., Tizzani P., Belleau E. Gastrointestinal parasitic infection in the hazel grouse *Tetrastes bonasia* in France. Wildlife Biology. 2021;(2):wlb00731. DOI: https://doi.org/10.2981/wlb.00731

2. Lieser M. Warum das Haselhuhn Tetrastes bonasia in Mitteleuropa keine Überlebenschance hat. Der Ornithologische Beobachter. 2018;115(3):255–259.
URL: https://www.ala-schweiz.ch/images/stories/pdf/ob/2018_115/OrnitholBeob_2018_115_255_Lieser.pdf

3. Zbinden N., Klaus S., Keller V. Bonasa bonasia – Hazel Grouse. In European Breeding Bird Atlas 2. Distribution, Abundance and Change. Keller V., Herrando S., Vorˇíšek P., Franch M., Kipson M., Milanesi P. et al., Eds. European Bird Census Council & Lynx Edicions: Barcelona, Spain. 2020. Pp. 86–87.

4. Равкин Е. С., Равкин Ю. С. Птицы равнин Северной Евразии: Численность, распределение и пространственная организация сообществ. Новосибирск: Наука, 2005. 304 с.

5. Равкин Е. С., Равкин Ю. С. Распределение запасов охотничьих птиц в таежной зоне европейской части России. Вестник охотоведения. 2014;11(2):270–274.

6. Мищенко А. Л., Белик В. П., Бородин О. В., Сарычев В. С., Суханова О. В., Краснов Ю. В. и др. Оценка численности и ее динамики для птиц европейской части России (результаты проекта "European Red List of Birds"). Под ред. А. Л. Мищенко. М.: Русское общество сохранения и изучения птиц им. М. А. Мензбира, 2017. 63 с.

7. Равкин Е. С., Мирутенко М. В., Богомолова И. Н. Численность и распределение некоторых видов охотничьих птиц в центре европейской части России. Орнитология. 2020;44:26–33.
Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46594616 EDN: CQDJFE

8. Равкин Е. С., Равкин Ю. С., Лялина М. И. Особенности летнего распределения и численности рябчика в европейской части России. Орнитологические исследования в странах Северной Евразии: тез. XV Междунар. орнитолог. конф. Северной Евразии, посвящ. памяти акад. М. А. Мензбира (165-летию со дня рожд. и 85-летию со дня смерти). Минск, 2020. С. 391–392.
Режим доступа: http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/koha:000702155

9. Равкин Е. С., Мирутенко М. В., Кирьякулов В. М., Спасик С. Е., Сойнова О. Л., Марченко П. С. Распределение и динамика численности лося и рябчика в Московской области. Охрана окружающей среды и заповедное дело. 2021;(1):49–63. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47370587 EDN: XACQPF

10. Klaus S., Ludwig T. Long-Term Trends of Hazel Grouse (Tetrastes bonasia) in the Bohemian Forest (Šumava), Czech Republic, 1972–2019. Birds. 2021;2(1):127–137. DOI: https://doi.org/10.3390/birds2010009

11. Сотников В. Н., Акулинкин С. Ф., Пономарев В. В. Гнездящиеся птицы Кировской области. Т. 1. Неворобьиные. Киров: ООО «Триада плюс», 2024. 168 с.

12. Кассал Б. Ю. Сибирский рябчик *Tetrastes bonasia ceptentrionalis* в Омской области. Байкальский зоологический журнал. 2020;1(27):55–67. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44282366 EDN: TJYGZR

13. Преловский В. А. Рябчик в Предбайкалье. Современные проблемы охотоведения: мат-лы национальной научн.-практ. конф. с международ. участием в рамках VIII Международ. научн.-практ. конф., посвящ. 85-летию Иркутского ГАУ «Климат, экология, сельское хозяйство Евразии». Иркутск, 22–26 мая 2019 года. Иркутск: Иркутский ГАУ им. А. А. Ежевского, 2019. С. 152–157. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38162399 EDN: ZSCGAP

14. Сергеев А. А. Рябчик (*Tetrastes bonasia* Linnaeus, 1758) как индикатор химического загрязнения ландшафтов. Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2015;20(4):940–944. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24906779 EDN: UZAXMJ

15. Зарубин Б. Е., Колесников В. В., Козлова А. В., Шевнина М. С., Экономов А. В. Видовая структура добычи мелкой дичи в Кировской области в начале XXI века. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021;22(4):597–607. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.4.597-607 EDN: VLVPDI

16. Колесников В. В., Дворников М. Г., Зарубин Б. Е., Козлова А. В., Кудрявцева А. А., Пиминов В. Н. и др. Состояние ресурсов охотничьих животных на территории страны и осуществление контроля получаемых данных при сохранении преемственности с предшествующими исследованиями. Киров: ФГБНУ ВНИИОЗ им. проф. Б.М. Житкова, 2022. 120 с.

17. Зарубин Б. Е., Колесников В. В., Макаров В. А., Сафонов В. Г., Шевнина М. С., Утробина В. В. Значение охоты и ее продукции глазами охотников России. Киров: Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б. М. Житкова, 2012. 76 с.

18. Глушков В. М., Граков Н. Н., Гревцев В. И., Зарубин Б. Е., Карпухин В. И., Козловский И. С. и др. Учеты и ресурсы охотничьих животных России. Киров: ВНИИОЗ РАСХН, ВГСХА, 2007. 302 с.

19. Matysek M., Gwiazda R., Zieba F., Klimecki M., Mateja R., Krzan P. High tourism activity alters the spatial distribution of Hazel Grouse (Tetrastes bonasia) and predation on artificial nests in a high-mountain habitat. Ornis Fennica. 2020;97(2):53–63. DOI: https://doi.org/10.51812/of.133966

20. Pêksa L., Ciach M. Negative effects of mass tourism on high mountain fauna: the case of the Tatra chamois Rupicapra rupicapra tatrica. Oryx. 2015;49(3):500–505. DOI: https://doi.org/10.1017/S0030605313001269

21. Савчено И. А. Влияние погодных факторов на ресурсы рябчика *Tetrastes bonasia* (L.) в подтайге Центральной Сибири. Вестник КрасГАУ. 2009;(8):103–109.
Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12914964 EDN: KWQBTV

22. Каверзнев В. Н. Охота на рябчиков. М.: Всесоюзное кооперативное объединенное издательство, 1932. 40 с.

23. Колосов А. М., Шибанов С. В. Боровая дичь, ее промысел и заготовка. М.: Изд-во Центросоюза, 1957. 116 с.

24. Борщевский В. Г., Хомякова И. А. Морфометрия тетерева *Lyrurus tetrix* L. и рябчика *Tetrastes bonasia* L. с севера Архангельской области. Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2023;(1):85–116. DOI: https://doi.org/10.17076/bg1639 EDN: UBHTSS

25. Романов А. Н. Очерк экологии рябчика в Коми АССР. Труды Коми филиала АН СССР. 1963;(12):79–86.

26. Гаврин В. Ф. Экология рябчика в Беловежской пуще. Беловежская пуща: Исследования: сб. тр. Минск, 1969. Вып. 3. С. 146–172.

27. Андреев М. Н., Макарющенко В. В. Современное состояние и проблемы охотничьего туризма в Кировской области. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2008;(11):187–190.
Режим доступа: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11917512 EDN: KAUOOL

28. Колесников В. В., Козловский И. С. Положение об охотничьих трофеях в Российской Федерации. М.: Росохотрыболовсоюз, 2010. 72 с.

References

1. Fanelli A., Tizzani P., Belleau E. Gastrointestinal parasitic infection in the hazel grouse *Tetrastes bonasia* in France. Wildlife Biology. 2021;(2):wlb00731. DOI: https://doi.org/10.2981/wlb.00731

2. Lieser M. Warum das Haselhuhn Tetrastes bonasia in Mitteleuropa keine Überlebenschance hat. Der Ornithologische Beobachter. 2018;115(3):255–259.
URL: https://www.ala-schweiz.ch/images/stories/pdf/ob/2018_115/OrnitholBeob_2018_115_255_Lieser.pdf

3. Zbinden N., Klaus S., Keller V. Bonasa bonasia – Hazel Grouse. In European Breeding Bird Atlas 2. Distribution, Abundance and Change. Keller V., Herrando S., Vorˇíšek P., Franch M., Kipson M., Milanesi P. et al., Eds. European Bird Census Council & Lynx Edicions: Barcelona, Spain. 2020. Pp. 86–87.

4. Ravkin E. S., Ravkin Yu. S. Birds of North Euroasian plains. Number, distribution and spatial organization of communities. Novosibirsk: *Nauka*, 2005. 304 p.

5. Ravkin E. S., Ravkin Yu. S. Distribution of game birds in the taiga zone of the European part of Russia. *Vestnik okhotovedeniya*. 2014;11(2):270–274. (In Russ.).

6. Mishchenko A. L., Belik V. P., Borodin O. V., Sarichev V. S., Su-khanova O. V., Krasnov Yu. V. et al. Assessment of abundance and its dynamics for birds in the European part of Russia (results of the European Red List of Birds project). *Pod red.* A. L. Mishchenko. Moscow: *Russkoye obshchestvo sokhraneniya i izucheniya ptits im. M. A. Menzbira*, 2017. 63 p.

7. Ravkin E. S., Mirutenko M. V., Bogomolova I. N. The number and distribution of some species of hunting birds in the center of the European part of Russia. *Ornitologiya*. 2020;44:26–33. (In Russ.).
URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46594616

8. Ravkin E. S., Ravkin Yu. S., Lyalina M. I. Peculiarities of summer distribution and abundance of the hazel grouse in the European part of Russia. Ornithological research in the countries of Northern Eurasia: Proceedings of the XV International Ornithological Conf. of Northern Eurasia, dedicated to the memory of Academician M. A. Menzbir (165th anniversary of his birth and 85th anniversary of his death). Minsk, 2020. pp. 391–392.
URL: http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/koha:000702155

9. Ravkin E. S., Mirutenko M. V., Kiryakulov V. M., Spasik S. E., Soynova O. L., Marchenko P. S. Moose and grouse distribution and dynamics in Moscow region. *Okhrana okruzhayushchey sredi i zapovednoye delo* = Environment Protection and Nature Reserve Management. 2021;(1):49–63. (In Russ.).
URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47370587

10. Klaus S., Ludwig T. Long-Term Trends of Hazel Grouse (Tetrastes bonasia) in the Bohemian Forest (Šumava), Czech Republic, 1972–2019. Birds. 2021;2(1):127–137. DOI: https://doi.org/10.3390/birds2010009

11. Sotnikov V. N., Akulinkin S. F., Ponomarev V. V. Nesting birds of the Kirov region. Vol. 1. Non-passerines. Kirov: *OOO «Triada plyus»*, 2024. 168 p.

12. Kassal B. Yu. Siberian hazel grouse *Tetrastes bonasia ceptentrionalis* in the Omsk region. *Baykalsky zoologichesky zhurnal*. 2020;1(27):55–67. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44282366

13. Prelovsky V. A. Hazel grouse in Predbaikalye. Current problems of game management: Proceedings of the national scientific-practical conference with international participation within the framework of the VIII International scientific-practical conference dedicated to the 85th anniversary of the Irkutsk State Autonomous Institution "Climate, Ecology, Agriculture of Eurasia." Irkutsk, May 22–26, 2019. Irkutsk: *Irkutsky GAU im. A. A. Yezhevskogo*, 2019. pp. 152–157.
URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38162399

14. Sergeyev A. A. Hazel grouse (*Tetrastes bonasia* Linnaeus, 1758) as an indicator of chemical pollution of landscapes. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvenniye i tekhnicheskiye nauki* = Tambov University Reports. Series Natural and Technical Sciences. 2015;20(4):940–944. (In Russ.).
URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24906779

15. Zarubin B. E., Kolesnikov V. V., Kozlova A. V., Shevnina M. S., Economov A. V. Species structure of small game hunting in the Kirov region at the beginning of the XXI century. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2021;22(4):597–607. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.4.597-607

16. Kolesnikov V. V., Dvornikov M. G., Zarubin B. E., Kozlova A. V., Kudryavtseva A. A., Piminov V. N. et al. The state of game resources in the country and the implementation of control over the data obtained while maintaining continuity with previous studies. Kirov: *FGBNU VNIIOZ im. prof. B. M. Zhitkova*, 2022. 120 p.

17. Zarubin B. E., Kolesnikov V. V., Makarov V. A., Safonov V. G., Shevnina M. S., Utrobina V. V. The importance of hunting and its products through the eyes of Russian hunters. Kirov: *Vserossiysky nauchno-issledovatelsky institut okhotnichyego khozyaystva i zverovodstva imeni professora B. M. Zhitkova*, 2012. 76 p.

18. Glushkov V. M., Grakov N. N., Grevtsev V. I., Zarubin B. E., Karpukhin V. I., Kozlovsky I. S. et al. Censuses and resources of game animals in Russia. Kirov: *VNIIOZ RASKHN, VGSKHA*, 2007. 302 p.

19. Matysek M., Gwiazda R., Zieba F., Klimecki M., Mateja R., Krzan P. High tourism activity alters the spatial distribution of Hazel Grouse (Tetrastes bonasia) and predation on artificial nests in a high-mountain habitat. Ornis Fennica. 2020;97(2):53–63. DOI: https://doi.org/10.51812/of.133966

20. Pêksa L., Ciach M. Negative effects of mass tourism on high mountain fauna: the case of the Tatra chamois Rupicapra rupicapra tatrica. Oryx. 2015;49(3):500–505. DOI: https://doi.org/10.1017/S0030605313001269

21. Savcheno I. A.Wweather factors influence on the resources of a hazel grouse – *Tetrastes bonasia* (L.) in the central Siberia subtaiga. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU. 2009;(8):103–109. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12914964

22. Kaverznev V. N. Hazel grouse hunting. Moscow: *Vsesoyuznoye kooperativnoye obyedinennoye izdatelstvo*, 1932. 40 p.

23. Kolosov A. M., Shibanov S. V. Forest game, its harvesting and preparation. Moscow: *Izd-vo Tsentrosoyuza*, 1957. 116 p.

24. Borshchevsky V. G., Khomyakova I. A. Morphometry of black grouse *Lyrurus tetrix* L. and hazel grouse *Tetrastes bonasia* L. from the north of the Arkhangelsk region, Russia. *Trudi Karelskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* = Transactions of the Karelian research centre of the Russian academy of sciences. 2023;(1):85–116. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.17076/bg1639

25. Romanov A. N. An essay on the ecology of hazel grouse in the Komi ASSR. *Trudi Komi filiala AN SSSR*. 1963;(12):79–86. (In Russ.).

26. Gavrin V. F. Ecology of the hazel grouse in Belovezhskaya Pushcha. Belovezhskaya Pushcha: Research: collection of papers. Minsk, 1969. Iss. 3. pp. 146–172.

27. Andreyev M. N., Makaryushchenko V. V. The current state and problems of hunting tourism in the Kirov region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2008;(11):187–190. (In Russ.). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11917512

28. Kolesnikov V. V., Kozlovsky I. S. Regulations on hunting trophies in the Russian Federation. Moscow: *Rosokhotribolovsoyuz*, 2010. 72 p.

Вклад авторов: Зарубин Б. Е., Экономов А. В., Козлова А. В., Степанов В. В., Перевозчикова М. А., Просеков А. Ю., Вечтомова Е. А., Пиминов В. Н., Стрельников Д. П. – внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации; Колесников В. В. – концепция и план исследования, анализ данных.

Сведения об авторах

Зарубин Борис Евгеньевич, кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник отдела охотничьего ресурсоведения и экологии животных, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б. М. Житкова», ул. Преображенская, д. 79, Киров, Российская Федерация, 610000, e-mail: vniioz43@mail.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5627-2192**

Колесников Вячеслав Васильевич, доктор биол. наук, доцент, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б. М. Житкова», ул. Преображенская, д. 79, Киров, Российская Федерация, 610000, e-mail: vniioz43@mail.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0242-8954**

✉ **Экономов Александр Вячеславович**, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник отдела охотничьего ресурсоведения и экологии животных, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б. М. Житкова», ул. Преображенская, д. 79, Киров, Российская Федерация, 610000, e-mail: vniioz43@mail.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0242-8954,** e-mail: aconom86@mail.ru

Козлова Анна Владимировна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник отдела охотничьего ресурсоведения и экологии животных, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б. М. Житкова», ул. Преображенская, д. 79, Киров, Российская Федерация, 610000, e-mail: vniioz43@mail.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6665-2755**

Степанов Валерий Вячеславович, младший научный сотрудник отдела охотничьего ресурсоведения и экологии животных, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б. М. Житкова», ул. Преображенская, д. 79, Киров, Российская Федерация, 610000, e-mail: vniioz43@mail.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1553-3670**

Перевозчикова Мария Александровна, кандидат вет. наук, старший научный сотрудник отдела звероводства (лаборатория ветеринарии), ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б. М. Житкова», ул. Преображенская, д. 79, Киров, Российская Федерация, 610000, e-mail: vniioz43@mail.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3638-3712**

Просеков Александр Юрьевич, доктор техн. наук, доктор биол. наук, академик РАН, профессор кафедры бионанотехнологии, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», ул. Красная, 6, г. Кемерово, Российская Федерация, 650000, e-mail: rector@kemsu.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5630-3196**

Вечтомова Елена Александровна, доктор техн. наук, доцент кафедры технологии продуктов питания из растительного сырья, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», ул. Красная, 6, г. Кемерово, Российская Федерация, 650000, e-mail: rector@kemsu.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6842-4537**

Пиминов Владимир Николаевич, кандидат биол. наук, ведущий научный сотрудник отдела охотничьего ресурсоведения и экологии животных, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б. М. Житкова», ул. Преображенская, д. 79, Киров, Российская Федерация, 610000, e-mail: vniioz43@mail.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5092-1314**

Стрельников Дмитрий Петрович, научный сотрудник, отдела охотничьего ресурсоведения и экологии животных, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б. М. Житкова», ул. Преображенская, д. 79, Киров, Российская Федерация, 610000, e-mail: vniioz43@mail.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9814-631X**

Author contributions: Zarubin B. E., Ekonomov A. V., Kozlova A. V., Stepanov V. V., Perevozchikova M. A., Prosekov A. Yu., Vechtomova E. A., Piminov V. N., Strelnikov D. P. – made an equivalent contribution to the preparation of the publication; Kolesnikov V. V. – research concept and plan, data analysis.

Information about the authors

Boris E. Zarubin, PhD in Agricultural Science, leading researcher, the Department of Hunting Resource Studies and Animal Ecology, Professor Zhitkov Federal State Budgetary Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming, 79 Preobrazhenskaya St., Kirov, Russian Federation, 610000, e-mail: vniioz43@mail.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0004-5627-2192**

Vyacheslav V. Kolesnikov, DSc in Biological Science, associate professor, Professor Zhitkov Federal State Budgetary Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming, 79 Preobrazhenskaya St., Kirov, Russian Federation, 610000, e-mail: vniioz43@mail.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0242-8954**

✉ **Aleksandr V. Ekonomov**, PhD in Biological Science, senior researcher, the Department of Hunting Resource Studies and Animal Ecology, Professor Zhitkov Federal State Budgetary Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming, 79 Preobrazhenskaya St., Kirov, Russian Federation, 610000, e-mail: vniioz43@mail.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0242-8954**, e-mail: aconom86@mail.ru

Anna V. Kozlova, PhD in Biological Science, senior researcher, the Department of Hunting Resource Studies and Animal Ecology, Professor Zhitkov Federal State Budgetary Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming, 79 Preobrazhenskaya St., Kirov, Russian Federation, 610000, e-mail: vniioz43@mail.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6665-2755**

Valery V. Stepanov, junior researcher, the Department of Hunting Resource Studies and Animal Ecology, Professor Zhitkov Federal State Budgetary Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming, 79 Preobrazhenskaya St., Kirov, Russian Federation, 610000, e-mail: vniioz43@mail.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1553-3670**,

Maria A. Perevozchikova, PhD in Veterinary Science, senior researcher, the Department of Fur Farming (the Laboratory of Veterinary), Professor Zhitkov Federal State Budgetary Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming, 79 Preobrazhenskaya St., Kirov, Russian Federation, 610000, e-mail: vniioz43@mail.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3638-3712**

Aleksandr Yu. Prosekov, DSc in Engineering, DSc in Biological Science, Academician of the Russian Academy of Sciences, professor at the Department of Bionanotechnology, Kemerovo State University, 6 Krasnaya St., Kemerovo, Russian Federation, 650000, e-mail: rector@kemsu.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5630-3196**

Elena A. Vechtomova, DSc in Engineering, associate professor at the Department of Technology of Food Products from Vegetable Raw Materials, Kemerovo State University, 6 Krasnaya St., Kemerovo, Russian Federation, 650000, e-mail: rector@kemsu.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6842-4537**

Vladimir N. Piminov, PhD in Biological Science, leading researcher, the Department of Hunting Resource Studies and Animal Ecology, Professor Zhitkov Federal State Budgetary Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming, 79 Preobrazhenskaya St., Kirov, Russian Federation, 610000, e-mail: vniioz43@mail.ru, **ORCID: https://orcid.org/0009-0008-5092-1314**

Dmitriy P. Strelnikov, researcher, the Department of Hunting Resource Studies and Animal Ecology, Professor Zhitkov Federal State Budgetary Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming, 79 Preobrazhenskaya St., Kirov, Russian Federation, 610000, e-mail: vniioz43@mail.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9814-631X**

✉ – Для контактов / Corresponding author

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ / MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.480–492
УДК 631.171:004.3:004.932

(cc) BY

Применение компьютерного зрения и глубокого обучения для автоматизированного мониторинга роста растений земляники садовой

© 2026. А. И. Кутырёв ✉, Р. А. Филиппов
ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Российская Федерация

В статье представлен разработанный алгоритм и программное обеспечение для автоматизированного мониторинга роста растений земляники садовой с применением нейросетевых технологий. Модели YOLO11x и YOLOx-seg, предварительно обученные методом трансферного обучения (transfer learning), адаптированы для распознавания и классификации растений (класс «plant»), листьев (класс «leaf») и эталонного маркера (класс «ref_obj») известного размера. Сегментация листьев земляники с помощью модели YOLO11x-seg позволяет анализировать морфометрические параметры отдельных листовых пластин (площадь, периметр, округлость, соотношение сторон). Сформирован и аннотирован набор RGB-изображений (2000 шт.), полученных с использованием камеры GoPro HERO11, в контролируемых лабораторных условиях, с последующей аугментацией для повышения устойчивости модели к вариациям условий съемки. Разработанный алгоритм преобразует координаты ограничивающих рамок (bounding boxes) и масок сегментации распознанных объектов в метрические единицы через калибровочные коэффициенты, вычисляемые по маркеру известного размера (100×100 мм). Программное обеспечение, реализованное с применением библиотек PyQt5, TensorFlow, Keras, OpenCV, предоставляет не только визуализацию результатов, но и хранение данных в локальной базе SQLite с возможностью экспорта в форматы JSON и Excel. Валидация модели показала высокую точность детектирования ограничивающих рамок растений (mAP50 = 0,906) и сегментации листьев (mAP50-mask = 0,625). Средняя скорость обработки составила 20,3 мс/кадр для детектирования и 34,5 мс/кадр для сегментации. Погрешность измерений составила менее 3,5 % для габаритных параметров растения и 5,2 % для морфометрических показателей листьев, подтверждая эффективность метода для оценки высоты, ширины и площади растений, а также анализа листового аппарата. Результаты исследований показали перспективность подхода для автоматизации фенотипирования растений в режиме реального времени.

Ключевые слова: *машинное обучение, обработка изображений, неинвазивный мониторинг, сегментация, нейросетевые технологии*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № FGUN-2025-0011).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Кутырёв А. И., Филиппов Р. А. Применение компьютерного зрения и глубокого обучения для автоматизированного мониторинга роста растений земляники садовой. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):480–492. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.480-492

Поступила в редакцию: 15.05.2025 Принята к публикации: 13.03.2026
Доработана после рецензирования: 05.09.2025 Опубликована онлайн: 27.04.2026

Application of computer vision and deep learning for automated monitoring of garden strawberry plant growth

© 2026. Alexey I. Kutyrev ✉, Rostislav A. Filippov
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

The article presents the developed algorithm and software for automated monitoring of strawberry plant growth using neural network technologies. The YOLO11x and YOLOx-seg models, pre-trained by transfer learning, are adapted to recognize and classify plants (plant class), leaves (leaf class), and a reference marker (ref_obj class) of a known size. Segmentation of strawberry leaves using the YOLO11x-seg model makes it possible to analyze the morphometric parameters of individual leaf plates (area, perimeter, roundness, aspect ratio). A set of RGB images (2000 pieces) obtained using a GoPro HERO11 camera under controlled laboratory conditions was formed and annotated, followed by augmentation to increase the model's resistance to variations in shooting conditions. The developed algorithm converts the coordinates of the bounding boxes and segmentation

masks of recognized objects into metric units using calibration coefficients calculated from a marker of known size (100×100 mm). The software implemented using PyQt5, TensorFlow, Keras, and OpenCV libraries provides not only visualization of results but also data storage in a local SQLite database with the ability to export to JSON and Excel formats. Validation of the model showed high accuracy in detecting plant bounding boxes (mAP50 = 0.906) and leaf segmentation (mAP50-mask = 0.625). The average processing speed was 20.3 ms/frame for detection and 34.5 ms/frame for segmentation. The measurement error was less than 3.5 % for the overall parameters of the plant and 5.2 % for the morphometric parameters of the leaves, confirming the effectiveness of the method for assessing the height, width and area of plants, as well as the analysis of the leaf apparatus. The research results show the promise of an approach for automating plant phenotyping in real time.

Ключевые слова: *machine learning, image processing, non-invasive monitoring, segmentation, neural network technologies*

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. FGUN-2025-0011).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors stated that there was no conflict of interest.

For citations: Kutyrev A. I., Filippov R. A. Application of computer vision and deep learning for automated monitoring of garden strawberry plant growth. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):480–492. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.480-492

Received: 15.05.2025
Received after review: 05.09.2025
Accepted for publication: 13.03.2026
Published online: 27.04.2026

Земляника садовая (*Fragáaria* × *ananássa*) является одной из наиболее распространённых ягодных культур в мире, обладает высокой питательной ценностью и стабильным потребительским спросом. Благодаря своим уникальным вкусовым качествам и высокому содержанию витаминов и антиоксидантов, земляника садовая пользуется большой популярностью на мировом рынке [1]. По данным FAO, мировое производство земляники ежегодно растет, что подчеркивает ее значимость в сельскохозяйственной отрасли[1].

Высокая продуктивность растений земляники садовой зависит не только от генетического потенциала сортов, но и правильно сформированного и своевременно проведённого комплекса оптимальных агротехнических мероприятий на всех этапах их развития [2]. Для достижения максимальной продуктивности и своевременного выявления отклонений в развитии растений необходим регулярный мониторинг вегетативных параметров роста растений [3].

Мониторинг развития надземной части растений земляники является важным этапом в селекционной работе при выведении новых сортов и сортоиспытаний, а также при исследовании влияния различных агротехнических приёмов, включая виды и дозы удобрений, корневые подкормки, регуляторы роста и средства защиты растений (СЗР). Детальный анализ динамики роста, морфологических характеристик, фенологических фаз и показателей продуктивности позволяет объективно оценить потенциал новых генотипов, выявить наиболее перспективные гибридные формы и определять их адаптивность к различным условиям выращивания [4]. Ключевым параметром, определяющим фотосинтетический потенциал растений и его продуктивность, является скорость роста листьев земляники садовой. Листовой аппарат растений земляники садовой является основным органом фотосинтеза, при этом количество листьев, скорость их формирования и площадь листовой поверхности значительно варьируют в зависимости от сортовых особенностей, возраста растения и условий выращивания. Скорость роста листьев представляет собой интегральный показатель, комплексно отражающий состояние растения, характеризует фотосинтетический потенциал и эффективность светопоглощения, уровень обеспеченности питанием (азотом, микроэлементами и др.), является индикатором биотических стрессов, включая поражение патогенами, и абиотических факторов засоления, температурных изменений, а также эффективности применения регуляторов роста. В агротехнических исследованиях мониторинг развития надземной части растений земляники необходим при отслеживании изменений в росте, развитии листьев, формировании цветоносов и плодов, что позволяет оценить эффективность применяемых агрохимикатов и биологических препаратов, оптимизировать схемы подкормок и защиты растений. Информация, полученная в результате мониторинга, является основой для разработки научно обоснованных рекомендаций по применению агротехнических приемов, обеспечивающих повышение урожайности и качества ягод [5].

[1]Данные ФАО по производству земляники садовой. [Электронный ресурс]. URL: https://www.fao.org/faostat/ru/#data/QCL/visualize (дата обращения 10.02.2025).

Традиционные методы мониторинга заключаются в визуальной оценке общего состояния растений (размер и габитус куста, степень облиственности, окрас, форма, размер листьев, наличие признаков болезней и вредителей) и фенологических фаз (образование листьев, цветение, плодоношение, созревание ягод). Такой метод предполагает ручное измерение роста и развития надземной части растений с использованием простых измерительных инструментов, что характеризуется трудоёмкостью процесса, погрешностью сбора данных и значительными временными затратами, особенно на крупных делянках.

Особое значение имеет разработка специализированного инструментария, позволяющего в автоматическом режиме оценивать площадь листовой поверхности и отслеживать динамику роста листового аппарата, что обеспечит высокую точность измерений, исключит субъективность ручных методов и позволит оперативно корректировать агротехнические мероприятия на основе объективных данных.

В современной науке и практике всё большее внимание уделяется технологиям компьютерного зрения и алгоритмам машинного обучения как перспективным инструментам автоматизированного мониторинга растений [6, 7]. В частности, системы компьютерного зрения (CV) активно внедряются в автоматизированное фенотипирование, обеспечивая неинвазивный и высокопроизводительный подход к отслеживанию динамики развития растений [8]. На основе анализа изображений, получаемых с использованием RGB, мультиспектральных и гиперспектральных камер, возможно получение объективных количественных характеристик, отражающих состояние растений [9, 10, 11]. Постоянный мониторинг развития растений, включающий учёт количества и площади листьев с помощью систем компьютерного зрения, обеспечивает возможность своевременного обнаружения изменений в фенологических фазах, что позволяет оперативно реагировать и нивелировать негативное действие стрессовых факторов [12].

Цель исследований – разработать алгоритм и программное обеспечение для неинвазивного мониторинга роста растений земляники с использованием нейросетевых технологий.

Научная новизна – разработаны алгоритм и программное обеспечение на основе нейросетевых технологий, обеспечивающие автоматизированный мониторинг роста растений земляники садовой, позволяя непрерывно отслеживать динамику ключевых параметров (высота, ширина, а также суммарная площадь листьев) в режиме реального времени.

Разработанное программное обеспечение предназначено для автоматизации этапа сбора и первичной обработки данных, что исключает субъективность ручных измерений и значительно повышает их производительность. Последующий анализ полученных данных и принятие агротехнических решений остаются за исследователем.

Материал и методы. Для мониторинга растений применяются различные методы обработки изображений (пороговая сегментация, выделение границ) [13, 14]. Методы машинного обучения (SVM, Random Forest) обеспечивают точность в контролируемых условиях, но требуют ручного выделения признаков, ограничивая адаптивность моделей [15, 16]. Методы на основе Vision Transformer (ViT) требуют значительный объем данных и вычислительных ресурсов, сложность архитектуры и большое количество параметров приводят к значительному увеличению времени обучения моделей [17].

Сравнительный анализ показывает, что алгоритмы машинного обучения на основе глубоких сверточных нейронных сетей (Convolutional Neural Network, CNN) являются одними из самых эффективных подходов для мониторинга растений. К таким алгоритмам относятся LeNet, AlexNet, VGG, GoogLeNet (Inception), ResNet, DenseNet, EfficientNet и другие [18, 19, 20]. Среди них семейство моделей YOLO (You Only Look Once), включая современную модель YOLO11, показывают наивысшую производительность в задачах мониторинга биологических объектов [21, 22]. Эти модели обеспечивают баланс между высокой точностью, скоростью работы и вычислительной эффективностью, что делает их наиболее подходящими для автоматизированного анализа изображений в сельском хозяйстве. Выбор моделей YOLO11x и YOLO11x-seg был основан на анализе данных с ресурса Computer Vision Model Leaderboard (https://leaderboard.roboflow.com), где модели показывают оптимальный баланс между точностью и скоростью для задач мониторинга. Компромисс между этими двумя критериями стал основным фактором выбора этих архитектур.

В исследовании применено трансферное обучение (transfer learning), при котором предварительно обученные на наборе данных COCO (Common Objects in Context) модели YOLO11x и YOLO11x-seg адаптированы

для распознавания объектов заданных классов на изображениях. Набор COCO содержит свыше 330 тысяч изображений с аннотациями более 2,5 миллионов объектов 80 классов.

Сбор данных, RGB-изображений земляники садовой (сорт Кабрилло) проводили в 2025 году в контролируемых лабораторных условиях с использованием камеры GoPro HERO11, обеспечивающей высокое разрешение изображений (5,3K, 5312×2988 пикселей) и широкий угол обзора 155°. Съемку осуществляли на многоярусной установке, где в качестве грунта использовали кокосовый субстрат, что позволило контролировать освещенность (фитосветильник мощностью 60 Вт, световой поток 7500 Лм, цветовая температура 4500 К) (рис. 1).

Рис. 1. **Сбор набора данных с использованием камеры GoPro HERO11 /**
Fig. 1. **Dataset collection using a GoPro HERO11 camera**

Камеру устанавливали на штативе Ulanzi OMBRA с регулируемой шаровой головкой на 360°, расстояние до объекта съемки варьировало от 0,3 до 0,6 м. Каждый снимок фиксировал растение земляники и эталонный маркер размером 100×100 мм. Съемка осуществлялась с нескольких ракурсов и под разными углами, что способствовало формированию вариативного набора данных, необходимого для обучения модели. Полученные изображения сохраняли в исходном качестве и перед обработкой проходили предварительную фильтрацию для исключения кадров с низкой четкостью.

Разметку данных выполняли с использованием платформы Roboflow. Загруженные на платформу изображения размечали и классифицировали на следующие типы объектов: растения (класс «plant»); листья (класс «leaf»); эталонный маркер (класс «ref_obj»). На каждом снимке проводилась ручная аннотация с выделением ограничивающих рамок (рис. 2) и масок сегментации (рис. 3) для определения координат объектов.

Дополнительная аугментация изображений, которая включала в себя вращение изображений (Rotation 15°) и изменение яркости (Brightness 15°), позволила расширить выборку до 2000 шт. изображений и повысить устойчивость модели к вариациям условий съемки. Помимо вращения изображений и изменения яркости, на предварительном этапе было использовано отражение по горизонтали, масштабирование, изменение контраста и добавление шума. Тестирование показало, что указанные два метода аугментации дали наиболее стабильное улучшение обобщающей способности модели. Установлен баланс изображений с классами «plant», «leaf» и классом «ref_obj» 55 и 45 % соответственно. При этом 70 % изображений использовали для обучения, 15 % – для валидации и 15 % – для итогового тестирования. Изображения распределены по различным фазам развития (бутонизация 45 %, начало цветения 41 %, начало плодоношения 14 %) и условиям освещения (использовано искусственное освещение в контролируемых условиях). При обучении нейросетевой модели изображения масштабируют до разрешения 640×640 пикселей в соответствии с требованиями архитектуры YOLO11.

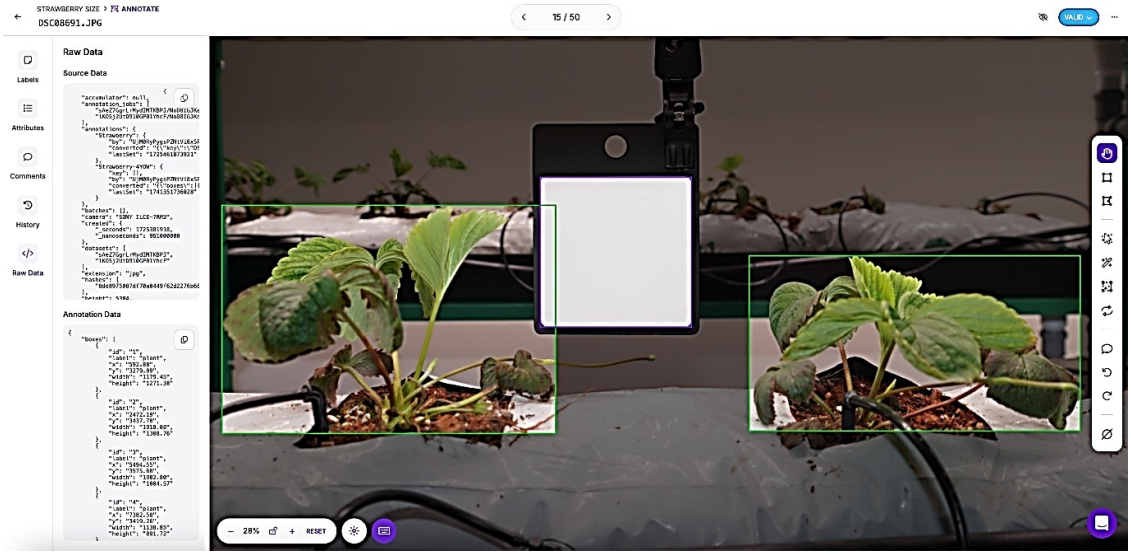


Рис. 2. **Аннотация набора данных с выделением ограничивающих рамок (Bounding box) /**
Fig. 2. **Dataset annotation with bounding box highlighting**

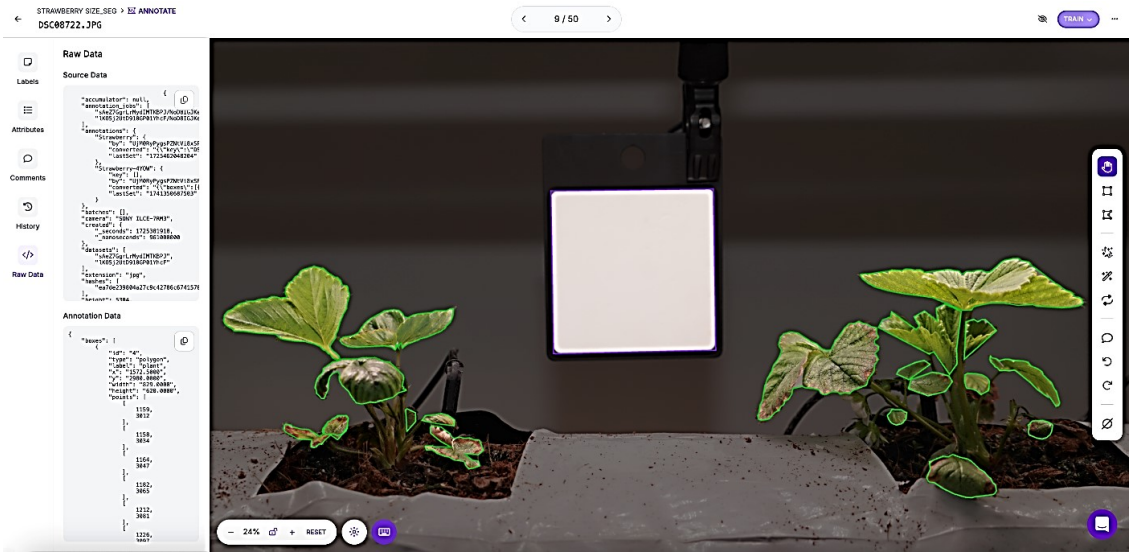


Рис. 3. **Аннотация набора данных с выделением масок сегментации (Mask) /**
Fig. 3. **Dataset annotation with segmentation masks (Mask) highlighting**

Метрики Precision и Recall использовали для оценки качества модели сверточной нейронной сети, определяя точность и полноту распознавания объектов как в процессе обучения, так и при тестировании на валидационных и тестовых наборах данных при распознавании ограничивающих рамок:

$$\text{Precision}_{\text{Box}} = \frac{\text{TP}_{\text{Box}}}{\text{TP}_{\text{Box}} + \text{FP}_{\text{Box}}} \quad (1)$$

$$\text{Recall}_{\text{Box}} = \frac{\text{TP}_{\text{Box}}}{\text{TP}_{\text{Box}} + \text{FN}_{\text{Box}}}, \quad (2)$$

где TP_{Box} – количество верно обнаруженных ограничивающих рамок, FP_{Box} – количество ложноположительных ограничивающих рамок, FN_{Box} – количество ложноотрицательных ограничивающих рамок.

Средняя точность (метрика mAP) использована для оценки модели при различных порогах классификации:

$$\text{mAP}_{\text{Box}} = \frac{1}{\text{n}} \sum_{\text{i}=1}^{\text{N}} \text{AP}_{\text{Box}}, \quad (3)$$

где N – количество классов объектов,
AP_{Box} – площадь под кривой точности-полноты (Precision-Recall curve) для каждого класса i при использовании ограничивающих рамок.

Оценка точности проведенной сегментации определялась с помощью метрики IoU (Intersection over Union):

$$\text{IoU} = \frac{\text{Area}_{\text{Intersection}}}{\text{Area}_{\text{Union}}}, \quad (4)$$

где $\text{Area}_{\text{Intersection}}$ – площадь пересечения между предсказанной маской (результат модели)

и истинной маской (ручная разметка), в пикселях, $Area_{Union}$ – площадь объединения предсказанной и истинной масок [23].

Метрика IoU оценивает точность совпадения масок, значение 1 означает идеальное совпадение, 0 – полное несовпадение.

Для оценки точности алгоритма при определении высоты, ширины и проекционной площади растений использовали эталонные ручные замеры линейкой (для линейных параметров) и анализ проекции на калиброванную миллиметровую сетку (для площади). Валидация была проведена на отдельной тестовой выборке, состоящей из 100 изображений, не использовавшихся на этапах обучения и валидации модели.

Определение точности измерений площади листовых пластин с помощью алгоритма YOLO11x-seg проводили в сравнении с эталонными данными, полученными на лабораторном при бореLI-3100 AREA METER (рис. 4).

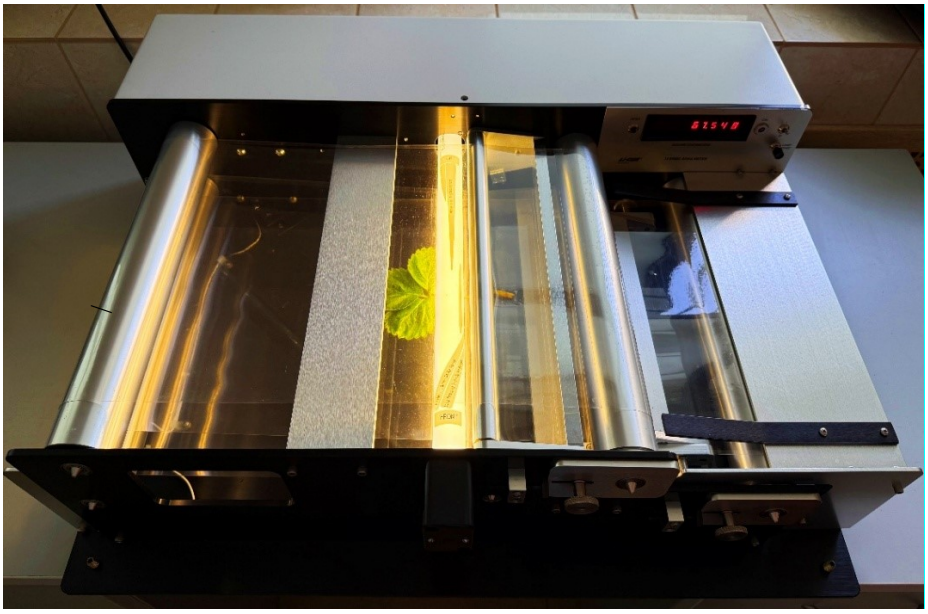


Рис. 4. **Измерение площади поверхности листа земляники садовой на лабораторном приборе LI-3100 AREA METER /**

Fig. 4. **Measurement of garden strawberry leaf surface area using the laboratory instrument LI-3100 AREA METER**

Было отобрано 50 листьев земляники садовой на различных стадиях развития. Для каждого листа получено RGB-изображение и проведено его измерение на приборе LI-3100. Образцы размещали на подвижной ленте прибора с минимальным шагом сканирования 1 мм² (для крупных листьев шириной до 10 см). Данные фиксировали программным обеспечением через USB-интерфейс.

В исследовании использовали программные библиотеки: CUDA 12.2 для параллельных вычислений на GPU; TensorFlow 2.15.0 и Keras 2.15.0 – для обучения нейронной сети; Tensor Board 2.15.0 – для визуализации процесса обучения: PyArrow 10.0.1 – для обработки больших объёмов данных; JAX 0.4.23 и JAXLib 0.4.23 – для численных расчётов с автоматическим дифференцированием. Кроме того, применяли NumPy для работы с многомерными массивами и математическими функциями, OpenCV – для задач компьютерного зрения, Pillow – для обработки изображений, matplotlib – для визуализации данных, PyQt5 – для создания графического интерфейса, для локального хранения результатов – база данных SQLite. Обучение моделей проводили на компьютере с центральным процессором Intel Core i9-10900X (10 ядер, 3.7 ГГц), оперативная память (RAM) 64 ГБ DDR4, высокоскоростной SSD-накопитель емкостью 1 ТБ, использованы 2 видеокарты NVIDIA GeForce RTX 2080 TI с памятью 11 ГБ GDDR6.

Результаты и их обсуждение. Обучение моделей YOLO11x и YOLO11x-seg, включающих 464 слоя и 56,8 млн параметров (194,4 GFLOPs) и 295 слоев 62,1 млн параметров (319,0 GFLOPs) соответственно, проводили с максимальным числом эпох 500, однако благодаря ранней остановке (patience = 100) процесс обучения завершился на 336-й эпохе (10,52 часа) для YOLO11x и 307-й эпохе (10,52 часа) для YOLO11x-seg. Предварительно обученные

модели YOLO11 оптимизированы с начальными параметрами lr0 = 0,01 (скорость обучения), momentum = 0,937 (инерция градиентного спуска), weight_decay = 0,0005 (регуляризация), с выбором оптимизатора «auto» (автоматический подбор) и задействованием 8 рабочих потоков (ускорение загрузки данных). При валидации модели YOLO11x на выборке из 300 изображений средняя точность (Box(P)) по всем классам составила 0,91, а средняя полнота (Mask(R)) = 0,93, при этом для класса «plant» значение Box(P) достигло 0,906, а класса «ref_obj» – 0,989; в свою очередь, модель YOLO11x-seg показала среднюю точность сегментации (Mask(P)) 0,802 и полноту (Mask(R)) 0,766 по всем классам с отдельными значениями Mask(P) для класса «leaf» – 0,625 и «ref_obj» – 0,968. Среднее время распознавания заданных классов на изображении моделью YOLO11x составило 20,3 мс/кадр, моделью YOLO11x-seg – 34,5 мс/кадр.

Разработанный алгоритм оценки размеров растения и анализа морфометрических параметров отдельных листовых пластин основывается на последовательном преобразовании данных (изображений), полученных от моделей YOLO11x и YOLO11x-seg, в физические параметры с использованием калибровочных коэффициентов, что обеспечивает переход от пиксельных координат к метрическим единицам измерения (рис. 5).

На первом этапе, после загрузки изображения, проводится распознавание ограничивающих рамок и масок сегментации для заданных классов («plant», «ref_obj», «leaf») и эталонного маркера известного размера (100x100 мм), который используется для определения масштаба изображения. При распознавании все исходные изображения с разрешением 5312×2988 пикселей предварительно приводятся к разрешению 1920×1080 пикселей. Модель YOLO11x возвращает координаты углов каждой рамки в формате $[x_1, y_1, x_2, y_2]$, (x_1, y_1) – левый верхний угол, (x_2, y_2) – правый нижний угол и бинарные маски сегментации для объектов класса «plant» и «leaf» в формате матрицы [H × W], где H и W – высота и ширина изображения. Значение 1 в матрице соответствует пикселям объекта, 0 – фону.

Координаты рамок и масок извлекаются из выходных данных модели для обоих объектов, что соответствует математическому представлению вектора:

$$B_i = \left[x_1^{(i)}, y_1^{(i)}, x_2^{(i)}, y_2^{(i)}\right], \quad (5)$$

где $i \in \{plant, ref\}$.

На втором этапе для растения рассчитываются высота и ширина как разность между соответствующими координатами рамки по формулам:

$$H_{plant}^{px} = y_2^{plant} - y_1^{plant}, \quad (6)$$

$$W_{plant}^{px} = x_2^{plant} - x_1^{plant}, \quad (7)$$

где y_2^{plant} и y_1^{plant} – вертикальные координаты (в пикселях) нижнего и верхнего краев рамки растения соответственно, x_2^{plant} и x_1^{plant} – горизонтальные координаты правого и левого краёв рамки растения соответственно.

Аналогично для эталонного объекта вычисляется его высота в пикселях, которая в дальнейшем используется для определения масштаба изображения.

Для масок сегментации листьев дополнительно вычисляется площадь по формуле:

$$A_{leaf}^{px} = \sum_{(x,y)} M(x, y), \quad (8)$$

где $M(x, y)$ –значение маски (0 или 1) в координате (x, y).

Границы маски для расчёта периметра определяются с использованием алгоритма выделения контуров.

Третий этап заключается в переводе пиксельных размеров в сантиметры с использованием эталонного объекта. Поскольку физический размер эталона известен, коэффициент преобразования (k_conv) рассчитывается как отношение эталонной высоты в миллиметрах к её высоте в пикселях:

$$k_{conv} = \frac{H_{ref}^{true}}{H_{ref}^{px}}, \quad (9)$$

где H_{ref}^{true} – известный физический размер эталонного объекта, мм; H_{ref}^{px} – высота эталонного объекта в пикселях, вычисленная как разность между координатами.

Четвертый этап включает в себя калибровку результатов для учёта возможных погрешностей, вызванных перспективными искажениями или неточностями модели. Пользователь может вручную задать калибровочный коэффициент (k_{calib}) через интерфейс или он вычисляется автоматически (функция «auto_calibrate»), при этом автокалибровка сравнивает расчетный размер эталона ($H_{ref}^{cm} = H_{ref}^{px} \cdot k_{conv}$) с его истинным размером (H_{ref}^{true}) и корректирует коэффициент. Это позволяет компенсировать систематические ошибки, например, если модель ошибочно определила размер эталона.

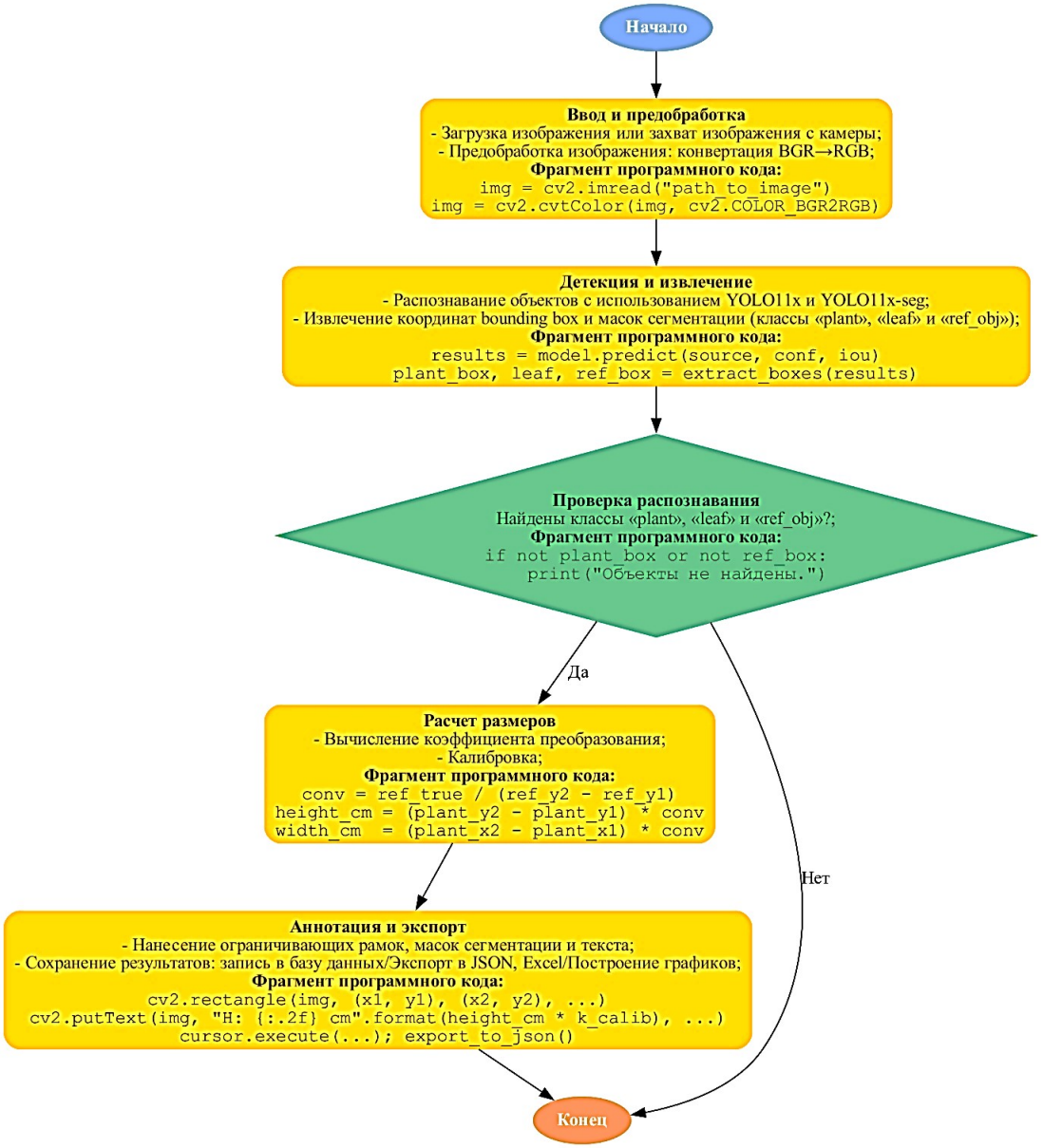


Рис. 5. **Алгоритм распознавания земляники садовой и оценки размеров растения с использованием нейросетевых технологий /**

Fig. 5. **Algorithm for garden strawberry recognition and plant size estimation using neural network technologies**

Пятый этап включает в себя применение калибровочного коэффициента к размерам растения. Калиброванные высота и ширина вычисляются умножением исходных значений на k_{calib}. Площадь растения рассчитывается как произведение калиброванных высоты и ширины, но для минимизации погрешностей сначала вычисляется площадь в пикселях, которая затем масштабируется с учётом коэффициентов преобразования и калибровки по формулам:

$$A_{plant}^{px} = H_{plant}^{px} \cdot W_{plant}^{px}, \quad (10)$$

$$A_{plant}^{cm} = A_{plant}^{px} \cdot (k_{conv} \cdot k_{calib})^2. \quad (11)$$

Периметр листа определяется:

$$P_{leaf} = N_{boundary} \cdot k_{conv} \cdot k_{calib}, \quad (12)$$

где $N_{boundary}$ – суммарное количество пикселей, через которые проходит граница листа, пикс.

Коэффициент округлости листьев вычисляется по формуле:

$$C_{leaf} = \frac{4\pi \cdot A_{leaf}^{cm}}{(P_{leaf})^2}. \quad (13)$$

Итоговые параметры (высота, ширина, площадь) накладываются на исходное изображение, выводятся в интерфейсе и сохраняются в локальную базу данных (SQLite) вместе с меткой времени и уверенностью (confidence) модели, что позволяет проводить последующий анализ данных.

Разработанное программное обеспечение осуществляет автоматизированный учёт морфометрических характеристик листового аппарата растений путём присвоения каждой листовой пластине уникального идентификационного номера (ID) с последующей фиксацией в базе данных количественных параметров, количество листовых пластин и их площадь, коэффициент округлости, соотношение сторон, длину периметра, угол наклона и другие параметры. Система реализует как индивидуальный анализ морфологических признаков на уровне отдельного листа, так и общую статистическую обработку данных для всей совокупности листьев, включая расчет суммарных площадей, средних значений и стандартных отклонений измеряемых показателей. Разработанный графический интерфейс с использованием библиотеки PyQt5 позволяет пользователю как загружать изображение из файла, так и получать его с камеры в реальном времени для дальнейшей обработки изображений, выделения ограничивающих рамок (рис. 6) и сегментации листовых пластин (рис. 7).

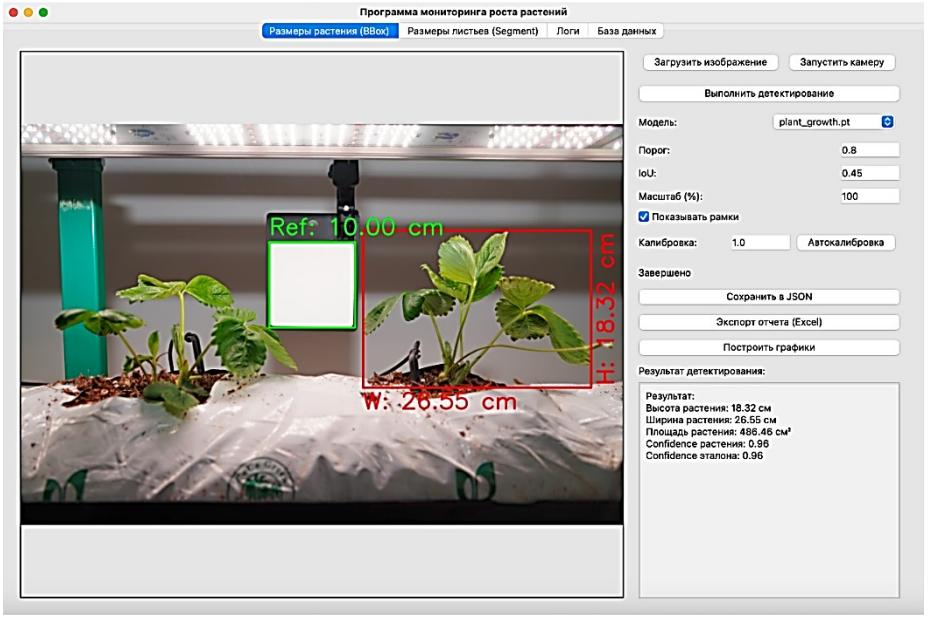


Рис. 6. **Интерфейс программного обеспечения для анализа параметров роста растений земляники садовой /**
Fig. 6. **Software interface for analyzing growth parameters of garden strawberry plants**

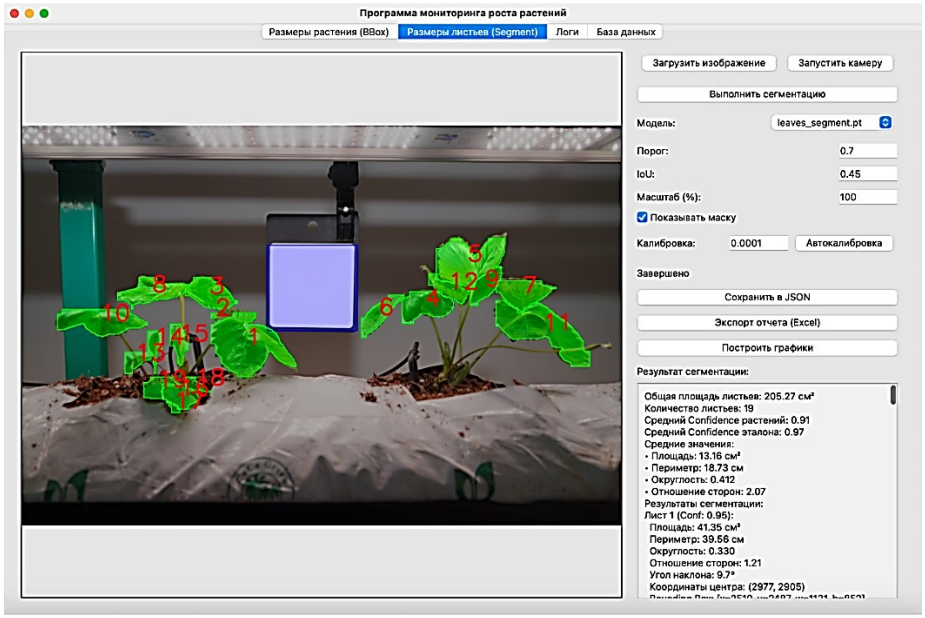


Рис. 7. **Интерфейс программного обеспечения для анализа морфометрических характеристик листового аппарата растений земляники садовой /**
Fig. 7. **Software interface for analyzing morphometric characteristics of the leaf apparatus in garden strawberry plants**

Предусмотрены функции экспорта данных в форматы JSON и Excel, а также построение графиков динамики изменения параметров растения с использованием библиотеки matplotlib.

На рисунках 8 и 9 представлены графики результатов мониторинга роста растения земляники садовой и изменения средней площади листовой поверхности в течение 35 дней.

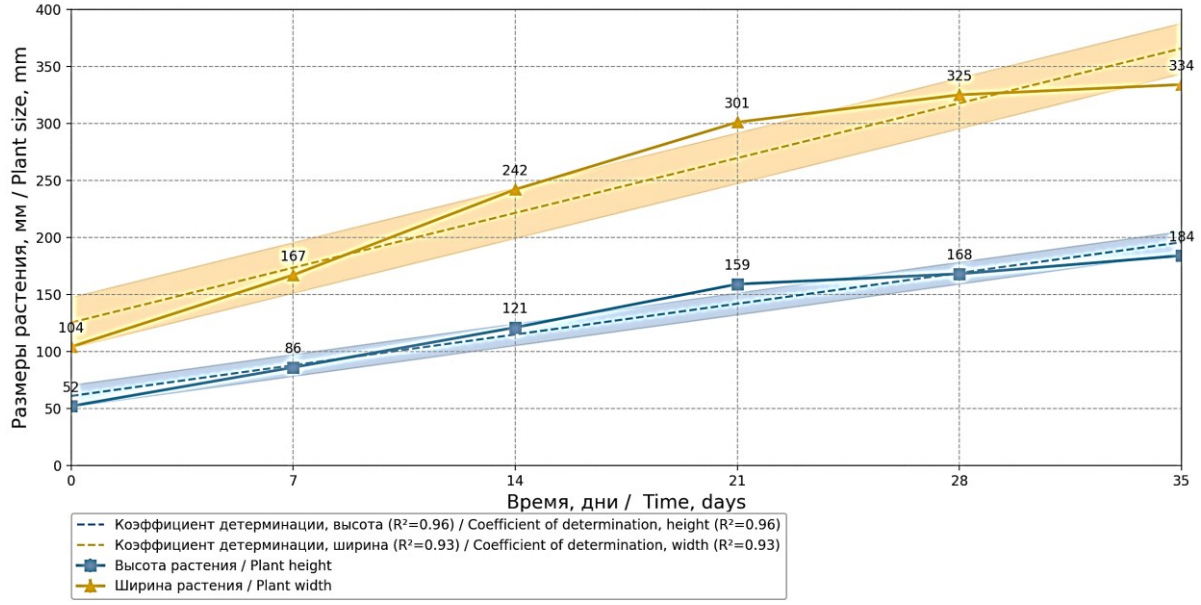


Рис. 8. **График динамики изменения роста (ширина, высота ограничивающей рамки) растения /**
Fig. 8. **Graph of plant growth dynamics (width, height of the bounding box)**

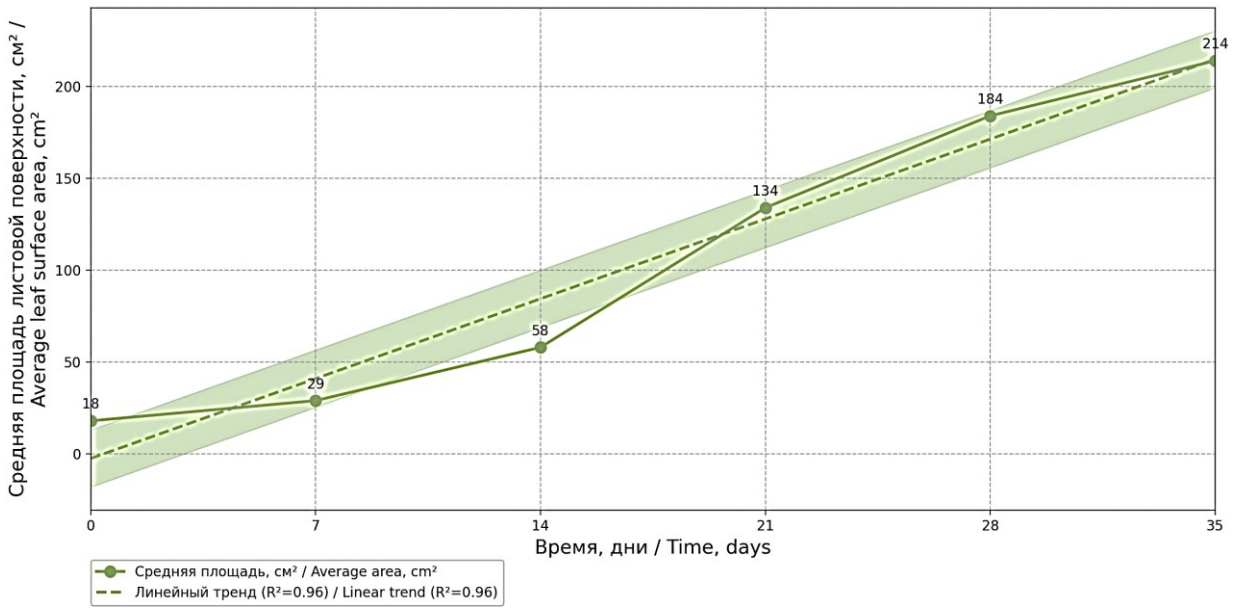


Рис. 9. **График динамики изменения средней площади листовой поверхности растения (сегментация листьев) /**
Fig. 9. **Graph of dynamics in the average leaf surface area of the plant (leaf segmentation)**

Для анализа динамики роста проведена линейная аппроксимация, результаты которой представлены пунктирными линиями. Коэффициенты детерминации $R^2 = 0,96$ для высоты и $R^2 = 0,93$ для ширины указывают на высокую степень линейной зависимости между временем наблюдения и размерами растения. Замедление прироста высоты после 21-го дня (с 3,8 мм/день в период первых 21 дня до 2,1 мм/день в последние две недели) коррелирует с переходом растения

к фазе бутонизации, что согласуется с биологическими особенностями культуры. Ширина растения показывает более стабильный прирост (в среднем 3,4 мм/день), что может быть связано с активным формированием розетки листьев.

Незначительное отклонение от линейного тренда динамики изменения средней площади листовой поверхности растения в начальный период (первые 7 дней) отражает адаптационную фазу, после которой скорость прироста площади стабилизируется. Полученные данные согласуются с типичными закономерностями роста культур в контролируемых условиях.

Серия тестов показала, что погрешность определения габаритных характеристик (высота, ширина, проекционная площадь растения) не превышает 3,5 %. Высокая точность измерений и низкая погрешность позволяют использовать предложенный алгоритм для автоматизированного мониторинга роста растений в контролируемых условиях. Ложноположительные срабатывания модели (false positives) наблюдали при фоновом шуме, ложноотрицательные срабатывания модели (false negatives) – в случаях частичного перекрытия объектов. Порог уверенности (confidence threshold) был оптимизирован в ходе экспериментов и установлен на уровне 0,54, что обеспечило оптимальный баланс между скоростью и точностью.

Сравнительный анализ результатов измерений показал, что разработанный алгоритм сегментации обеспечивает погрешность менее 5,2 % при определении площади отдельных листовых пластин по сравнению с эталонным методом. Также было изучено влияние перспективных искажений, возникающих при съемке под различными углами, и определено, что при отклонении камеры более чем на 15° от перпендикуляра наблюдается увеличение ошибки на 1-2 %. Для компенсации ошибки предусмотрена возможность корректировки калибровочного коэффициента в интерфейсе программы.

Разработанный программный код реализует полный цикл обработки от детектирования объектов до анализа и визуализации. Пользователь может настраивать такие параметры, как порог уверенности (confidence threshold), пересечение ограничивающих рамок IoU (Intersection over Union) и масштаб изображения, что позволяет адаптировать работу моделей YOLO11 под различные условия съёмки и повысить точность детекции. Перспективы дальнейших исследований включают интеграцию лидарных данных с моделью сверточной нейронной сети YOLO11 [24], что позволит повысить точность измерений за счет получения информации о трехмерной структуре растений.

Текущая реализация системы решает задачу точного и автоматизированного измерения параметров в условиях закрытого грунта, что является основным этапом мониторинга. Система позволяет отслеживать изменения одного и того же растения в условиях закрытого грунта с жёстко закреплёнными камерами и эталонными маркерами, которые служат не только для калибровки, но и для привязки к конкретной точке съёмки. Для применения в полевых условиях, где присутствуют вариации освещённости, фона, углов съёмки и возможны перемещения камеры, требуются дополнительные алгоритмы. Перспективным направлением является использование методов трекинга (например, Simple Online and Realtime Tracking, SORT или DeepSORT) для отслеживания растений по их местоположению между последовательными кадрами видео или отдельными снимками. Для работы в условиях изменяющегося естественного освещения и сложного фона необходим сбор дополнительного обширного датасета и дообучение моделей на таких данных, а также использование методов аугментации, имитирующих эти условия (наложение случайных теней, изменение цветового баланса, симуляция различных погодных условий).

Заключение. Разработанное программное обеспечение позволяет автоматизировать процесс высокоточного измерения ключевых морфометрических параметров растений земляники садовой (высота, ширина, площадь листьев). Использование разработанного алгоритма позволяет проводить оценку влияния агротехнических приёмов в режиме реального времени за счёт высокой скорости обработки данных и низкой погрешности измерений, исключая субъективность, свойственную визуальным оценкам. Особую ценность представляет возможность отслеживания динамики роста отдельных листьев, что важно для ранней диагностики стрессовых состояний и оценки эффективности подкормок.

Программное обеспечение позволяет проводить сбор данных в течение нескольких вегетационных сезонов с сохранением результатов в базе данных для дальнейшего построения высокоточных прогнозных моделей динамики роста и развития растений. Применение сверточных нейронных сетей позволит проводить

детальную количественную оценку влияния разнообразных факторов (изменений освещенности, температуры, влажности и состава питательного раствора и др.) на рост растений. Разработанное программное обеспечение создаёт предпосылки для его внедрения в селекционные исследования и сортоиспытания, направленные на оптимизацию агротехнических мероприятий для повышения продуктивности земляники садовой.

References

1. Ожерельев В. Н., Ожерельева М. В., Гринь А. М., Сомин В. В. Динамика производства ягод земляники садовой по странам мира. Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. 2019;(4(74)):60–66. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=39174971 EDN: EMFTKC

Ozherelev V. N., Ozhereleva M. V., Grin A. M., Somin V. V. Dynamics of garden strawberries production all over the world. *Vestnik Bryanskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* = Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2019;(4(74)):60–66. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=39174971

2. Марченко Л. А. Продуктивность земляники садовой и селекционные возможности ее повышения. Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2021;51(3):65–74.
DOI: https://doi.org/10.26898/0370-8799-2021-3-7 EDN: XRWZRZ

Marchenko L. A. Productivity of garden strawberry and breeding possibilities to improve it. *Sibirskiy vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki* = Siberian Herald of Agricultural Science. 2021;51(3):65–74. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.26898/0370-8799-2021-3-7

3. Guan Z., Abd-Elrahman A., Fan Z., Whitaker V. M., Wilkinson B. Modeling strawberry biomass and leaf area using object-based analysis of high-resolution images. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2020;163:171–186. DOI: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.02.021

4. Марченко Л. А., Акимова С. В., Соловьев А. В., Макаров С. С., Самощенков Е. Г., Тер-Петросянц Г. Э., Зубков А. В. Роль минеральных элементов в питании растений земляники садовой. Овощи России. 2024;(5):79–83. DOI: https://doi.org/10.18619/2072-9146-2024-5-79-83 EDN: PXIWHJ

Marchenko L. A., Akimova S. V., Solovyov A. V., Makarov S. S., Samoshenkov E. G., Ter-Petrosyants G. E., Zubkov A. V. Role of mineral elements in the nutrition of garden strawberry plants. *Ovoshchi Rossii* = Vegetable crops of Russia. 2024;(5):79–83. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.18619/2072-9146-2024-5-79-83

5. Haida M., El Khalloufi F., Mugani R., Redouane E. M., Campos A., Vasconcelos V., Oudra B. Effects of Irrigation with Microcystin-Containing Water on Growth, Physiology, and Antioxidant Defense in Strawberry Fragaria vulgaris under Hydroponic Culture. Toxins. 2022;14(3):198 DOI: https://doi.org/10.3390/toxins14030198

6. Mi Z., Yan W. Q. Strawberry Ripeness Detection Using Deep Learning Models. Big Data and Cognitive Computing. 2024;8(8):92. DOI: https://doi.org/10.3390/bdcc8080092

7. Хорт Д. О., Кутырев А. И., Смирнов И. Г., Воронков И. В. Разработка системы автоматизированного управления агротехнологиями в садоводстве. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021;15(2):61–68. DOI: https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-2-61-68 EDN: AQNSNT

Khort D. O., Kutyrev A. I., Smirnov I. G., Voronkov I. V. Development of an Automated Management System for Agricultural Technologies in Horticulture. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2021;15(2):61–68. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-2-61-68

8. Zhang Y., Zhang L., Yu H., Guo Z., Zhang R., Zhou X. Research on the Strawberry Recognition Algorithm Based on Deep Learning. Applied Sciences. 2023;13(20):11298. DOI: https://doi.org/10.3390/app132011298

9. Shurygin B., Smirnov I. G., Chilikin A., Khort D. O., Kutyrev A. I., Zhukovskaya S., Solovchenko A. Mutual augmentation of spectral sensing and machine learning for non-invasive detection of apple fruit damages. Horticulturae. 2022;8(12):1111. DOI: https://doi.org/10.3390/horticulturae8121111

10. Khort D. O., Kutyrev A., Smirnov I., Andriyanov N., Filippov R., Chilikin A. et al. Enhancing sustainable automated fruit sorting: hyperspectral analysis and machine learning algorithms. Sustainability. 2024:16(22):10084. DOI: https://doi.org/10.3390/su162210084

11. Хорт Д. О., Кутырев А. И., Смирнов И. Г., Филиппов Р. А., Вершинин Р. В. Разработка алгоритмов системы распознавания ягод земляники садовой при роботизированном сборе. Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020:67(1(38)):133–141. DOI: https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-1-133-141 EDN: BYNXCB

Khort D. O., Kutyrev A. I., Smirnov I. G., Filippov R. A., Vershinin R. V. Razrabotka algoritmov sistemy raspoznavaniya yagod zemlya-niki sadovoy pri robotizirovannom sbore. *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2020:67(1(38)):133–141. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-1-133-141

12. Xie D., Yao W., Sun W., Song Z. Real-Time Identification of Strawberry Pests and Diseases Using an Improved YOLOv8 Algorithm. Symmetry. 2024:16(10):1280. DOI: https://doi.org/10.3390/sym16101280

13. Yang J.-W., Kim H.-I. An Overview of Recent Advances in Greenhouse Strawberry Cultivation Using Deep Learning Techniques: A Review for Strawberry Practitioners. Agronomy. 2024;14(1):34.
DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy14010034

14. Jovanović R., Djordjevic A., Stefanovic M., Eric M., Pajić N. Enhanced Defect Management in Strawberry Processing Using Machine Vision: A Cost-Effective Edge Device Solution for Real-Time Detection and Quality Improvement. Applied Sciences. 2024;14(17):7771. DOI: https://doi.org/10.3390/app14177771

15. Fan L., Yu J., Zhang P., Xie M. Prediction of Strawberry Quality during Maturity Based on Hyperspectral Technology. Agronomy. 2024;14(7):1450. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy14071450

16. Basak J. K., Paudel B., Kim N. E., Deb N. C. Kaushalya Madhavi B. G., Kim H. T. Non-Destructive Estimation of Fruit Weight of Strawberry Using Machine Learning Models. Agronomy. 2022;12(10):2487. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy12102487

17. Christakakis P., Giakoumoglou N., Kapetas D., Tzovaras D., Pechlivani E.-M. Vision Transformers in Optimization of AI-Based Early Detection of Botrytis cinerea. AI. 2024;5(3):1301–1323. DOI: https://doi.org/10.3390/ai5030063

18. Xiao J.-R., Chung P.-C., Wu H.-Y., Phan Q.-H., Yeh J.-L.A., Hou M.T.-K. Detection of Strawberry Diseases Using a Convolutional Neural Network. Plants. 2021;10(1):31. DOI: https://doi.org/10.3390/plants10010031

19. Kesler S., Karakan A., Oğuz Y. Real-Time Strawberry Plant Classification and Efficiency Increase with Hybrid System Deep Learning: Microcontroller and Mobile Application. Applied Sciences. 2022;12(17):8860. DOI: https://doi.org/10.3390/app12178860

20. Kim H., Kim D. Deep-Learning-Based Strawberry Leaf Pest Classification for Sustainable Smart Farms. Sustainability. 2023;15(10):7931. DOI: https://doi.org/10.3390/su15107931

21. Wang C., Wang H., Han Q., Zhang Z., Kong D., Zou X. Strawberry Detection and Ripeness Classification Using YOLOv8+ Model and Image Processing Method. Agriculture. 2024;14(5):751. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture14050751

22. Chen Y., Xu H., Chang P., Huang Y., Zhong F., Jia Q. et al. CES-YOLOv8: Strawberry Maturity Detection Based on the Improved YOLOv8. Agronomy. 2024;14(7):1353. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy14071353

23. 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: https://doi.org/10.3390/rs13132450

24. Saha K. K., Tsoulias N., Weltzien C., Zude-Sasse M. Estimation of Vegetative Growth in Strawberry Plants Using Mobile LiDAR Laser Scanner. Horticulturae. 2022;8(2):90. DOI: https://doi.org/10.3390/horticulturae8020090

Вклад авторов:
Авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Сведения об авторах

✉ **Кутырёв Алексей Игоревич,** кандидат техн. наук, заведующий лабораторией интеллектуальных цифровых систем мониторинга, диагностики и управления процессами в сельскохозяйственном производстве, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7643-775X**, e-mail: alexeykutyrev@gmail.com

Филиппов Ростислав Александрович, кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, д.5, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3586-3634**

Author Contributions:
The authors contributed equally to the preparation of this publication.

Information about the authors

✉ **Alexey I. Kutyrev,** PhD in Engineering, Head of the Laboratory of Intelligent Digital Systems for Monitoring, Diagnostics and Process Management in Agricultural Production, leading researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institute passage, 5, Moscow, Russian Federation, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7643-775X**, e-mail: alexeykutyrev@gmail.com

Rostislav A. Filippov, PhD in Agricultural Science, leading researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institute passage, 5, Moscow, Russian Federation, e-mail: vim@vim.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3586-3634**

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.493–503
УДК 535.241.46:004.032.26

(cc) BY

Применение искусственной нейронной сети при моделировании распределения освещенности в трехмерном пространстве

© 2026. С. А. Ракутько✉, Е. Н. Ракутько
Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе рассмотрено моделирование трехмерного распределения освещенности от источников света с помощью искусственной нейронной сети (ИНС). Наиболее остро эти вопросы стоят в тепличных облучательных установках из-за конструктивных особенностей – значительных габаритов излучателей относительно малой высоты подвеса, что исключает их представление точечным источником. Цель исследования – разработка методики моделирования распределения освещенности в трехмерном пространстве, включающей получение экспериментальных данных и их обработку с помощью искусственной нейронной сети. Датасет размером 2100 записей получен экспериментально для разработанного фитооблучателя. Измеряли значения освещенности E в узлах координатной сетки с шагом 10 см в пределах от 0 до 120 см (по координате x) и от 0 до 100 см (по координате y) во всех четырех квадрантах, при различной высоте подвеса фитооблучателя h на уровнях 30, 50, 70 и 90 см. Для построения модели применены библиотеки TensorFlow и Keras языка программирования Python. Моделирование проводили в Google Colab. Результаты показали, что созданная нейросеть эффективно описывает распределение потока на облучаемой поверхности, учитывая реальную геометрию источника света. Ключевое преимущество метода – возможность расчета освещенности для любой комбинации высоты подвеса и координат точки на плоскости, что преодолевает ограничения традиционных светотехнических расчетов, основанных на законе обратных квадратов. Средняя абсолютная ошибка нейросетевой модели составляет 0,04 клк, значение коэффициента детерминации R^2 = 0,9967 с 95%-м доверительным интервалом [0,09953, 0,9977], что является хорошим результатом. Средняя ошибка предсказаний составляет 7,5 %, эта величина может быть улучшена путем регуляризации и аугментации данных. Показано, что метод ИНС применим для проектирования энергоэффективных осветительных систем, адаптируем к учету спектральных характеристик и отраженного света. После повторного обучения модель может быть использована для фитооблучателей произвольной конструкции, что расширяет ее практическую значимость в светокультуре.

Ключевые слова: *светокультура, фитооблучатель, нейросетевое моделирование, горизонтальная освещенность, равномерность освещения*

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № FGUN-2025-0010).
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Ракутько С. А., Ракутько Е. Н. Применение искусственной нейронной сети при моделировании распределения освещенности в трехмерном пространстве. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):493–503. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.493-503

Поступила: 23.06.2025 Принята к публикации: 20.03.2026
Доработана после рецензирования: 08.08.2025 Опубликована онлайн: 27.04.2026

Application of artificial neural network in modeling illumination distribution in three-dimensional space

© 2026. Sergei A. Rakutko✉, Elena N. Rakutko
Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Saint-Petersburg, Russian Federation

The paper deals with modeling three-dimensional illumination distribution from light sources using artificial neural network (ANN). This problem is especially relevant in greenhouse irradiation systems due to the design features, namely large dimensions of the phytoirradiators relative to the small suspension height, which makes it impossible to represent them as point sources. The aim of the research is to develop a methodology for modeling illumination distribution in three-dimensional space, which includes obtaining experimental data and processing them using an artificial neural network. A dataset comprising 2,100 records was obtained experimentally for the developed phytoirradiator. The illumination values E were measured at the nodes of the coordinate grid with a step of 10 cm within the range from 0 to 120 cm (along the x coordinate) and from 0 to 100 cm (along the y coordinate) in all four quadrants, at different suspension height of the phytoirradiator h at levels of 30, 50, 70 and 90 cm. The TensorFlow and Keras libraries of the Python programming language were used to build the model. The results showed that the created neural network effectively describes the flux distribution on the irradiated surface, taking into account the real geometry of the light source. The key advantage of the method is the ability to calculate illumination for any combination of suspension height and point coordinates on the plane, which overcomes the limita-

tions of conventional lighting calculations based on the inverse square law. The mean absolute error of the neural network model is 0.04 klx, the value of the determination coefficient R^2 = 0.9967 with a 95 % confidence interval of [0.09953, 0.9977], which is a good result. Mean absolute prediction error is 7.5 %, this value can be improved by regularization and data augmentation. It has been established that ANN-based method is applicable to the design of energy-efficient lighting systems, adaptable to the spectral characteristics and reflected light. After retraining, the model can be used for phytoirradiators of arbitrary design, which expands its practical significance in plant lighting.

Keywords: *plant lighting, phytoirradiator, neural network modeling, horizontal illumination, uniformity of illumination*

Acknowledgement: the research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. FGUN-2025-0010).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

***Conflict of interest*:** the authors stated no conflict of interest.

For citation: Rakutko S. A., Rakutko E. N. Application of artificial neural network in modeling illumination distribution in three-dimensional space. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):493–503. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.493-503

Received: 23.06.2025
Revised: 08.08.2025
Accepted for publication: 20.03.2026
Published online: 27.04.2026

На сегодняшний день в научных исследованиях, в проектной и практической деятельности все большее распространение получают искусственные нейронные сети (ИНС). Диапазон областей их применения крайне широк от инженерно-технических и проектных решений до экологических разработок [1].

В контексте светокультуры – перспективном направлении растениеводства, основанном на выращивании растений при искусственном освещении – нейросетевые технологии находят применение для: мониторинга состояния растений как биологических объектов; распознавания и классификации признаков дефицита питательных элементов по изображению листьев [2]; оптимизации микроклимата умных теплиц [3]; определения биомассы растений по визуальному состоянию [4] и выявления заболеваний растений [5].

В технических аспектах светокультуры ИНС демонстрируют высокую эффективность при решении таких задач: классификация видов искусственного освещения [6]; поиск оптимального графика освещения для выращивания растений с учетом динамического ценообразования на электроэнергию [7]; моделирование зависимости цветовой температуры освещения от источника света и оптической системы светильника [8]; прогнозирование естественной освещенности [9]; управление системами общего освещения [10] и гидропоники [11]; измерение освещенности в помещении, оценка его качества и комфортности [12]; интеллектуальное управление электроснабжением установок освещения [13]. ИНС широко применяются в светотехнических расчетах[1], а также при проектировании электрического освещения [14].

Особенно актуальна проблема моделирования распределения светового потока в тепличных комплексах. Тепличные облучательные установки являются неотъемлемым элементом светокультуры. Обеспечение равномерности распределения освещенности по площади выращивания является важным для повышения эффективности использования энергии и улучшения качества растений наряду с другими требованиями. Известна взаимосвязь между коэффициентом полезного использования потока и равномерностью создаваемой освещенности, что обеспечивает возможность оценки энергоэффективности по известной картине распределения освещенности на плоскости. Высказано предположение, что этот показатель может характеризовать экологичность светокультуры [15]. Также показано, что компоновочные параметры облучательной установки (высоты подвеса и расположение облучателя относительно границ участка облучения) влияет на энергоэкологичность светокультуры [16].

Особенностью компоновки фитооблучателей в светокультуре является их низкое расположение относительно растений при значительных по сравнению с этим расстоянием габаритах самого фитооблучателя. Это препятствует использованию хорошо разработанных классических методов расчета распределения облученности, таких как точечный или метод коэффициентов использования, а также современных программ моделирования освещенности типа DiaLux Evo и т. п.

[1]Применение нейросетей для светотехнических расчетов. [Электронный ресурс]. URL: https://geolighting.ru/stati-o-bytovom-primenenii/nejroseti-v-svetotehnicheskih-raschetah (дата обращения: 25.07.2024).

Цель исследования – разработка методики моделирования распределения освещенности в трехмерном пространстве, включающей получение экспериментальных данных и их обработку с помощью искусственной нейронной сети.

Научная новизна – интеграция экспериментального подхода к исследованию светового поля и современных методов машинного обучения для решения прикладной задачи в аграрной инженерии, что представляет собой шаг вперёд относительно традиционных методов расчёта.

Материал и методы. Для получения экспериментальных данных использовали разработанный в лаборатории фитооблучатель[2] (рис. 1).

Рис. 1. **Фитооблучатель /**
Fig. 1. **Phytoirradiator**

Рис. 2. **Измерения горизонтальной освещенности, создаваемой фитооблучателем на плоскости /**
Fig. 2. **Measurements of horizontal illumination created by the phytoirradiator on the plane**

Светодиоды различного спектра излучения скомпонованы на прямоугольной площадке радиатора длиной 990 см и шириной 6 см. Измерения вели при включении группы белых светодиодов (45 шт., 3 Вт), поскольку диапазон их излучения наиболее соответствует спектральной чувствительности применяемого люксметра ТКА-ПКМ 31. В темной комнате люксметром измеряли значения освещенности *E,* клк, в узлах координатной сетки с шагом 10 см в пределах от 0 до 120 см (по координате *x*) и от 0 до 100 см (по координате *y*).

Измерения вели во всех четырех квадрантах при различной высоте подвеса фитооблучателя *h* на уровнях 30, 50, 70 и 90 см (рис. 2). Размер полученного датасета – 2100 записей (четыре уровня по *h* * 25 отсчетов по *x* * 21 отсчетов по *y*). Структура ИНС для его обработки показана на рисунке 3. Для выбора оптимальной архитектуры ИНС были проведены сравнительные эксперименты с различным числом скрытых слоёв (1–4) и числом нейронов на слой (16, 32, 64, 128), а также с разными функциями активации (*ReLU, LeakyReLU, ELU, tanh*).

Элементы матриц структуры ИНС первоначально заполняются случайными числами и при обратных проходах (*Back Propagation*), во время процедуры обучения, приходят к значениям, при которых предсказываемый выход сети максимально близок к экспериментальным данным. По известным матрицам весов, между входным слоем и первым скрытым слоем $W^{(1)}$, между первым и вторым скрытыми слоями $W^{(2)}$, между вторым скрытым и выходным слоем $W^{(3)}$ смещений (*bias*) для нейронов соответствующих слоев $B^{(1)}$, $B^{(2)}$ и $B^{(3)}$ (на структуре не показаны) и входном векторе X при прямом проходе (*Forward Propagation*) реализуются вычисления:

$$h^{(1)} = \sigma(W^{(1)}X + B^{(1)});$$
$$h^{(2)} = \sigma(W^{(2)}h^{(1)} + B^{(2)});$$
$$y = \sigma_{out}(W^{(3)}h^{(2)} + B^{(3)}), \quad (1)$$

где σ, σ_{out} – соответствующие функции активации.

[2]Ракутько С. А., Медведев Г. В., Ракутько Е. Н., Гулин С. В. Светодиодный фитооблучатель: пат. на полезную модель №234599 Российская Федерация. № 2025105417: заявл. 10.03.2025; опубл. 03.06.2025. Бюл. №16. 10 с. URL: https://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWU1/000/000/000/234/599/ПМ-00234599-00001/document.pdf

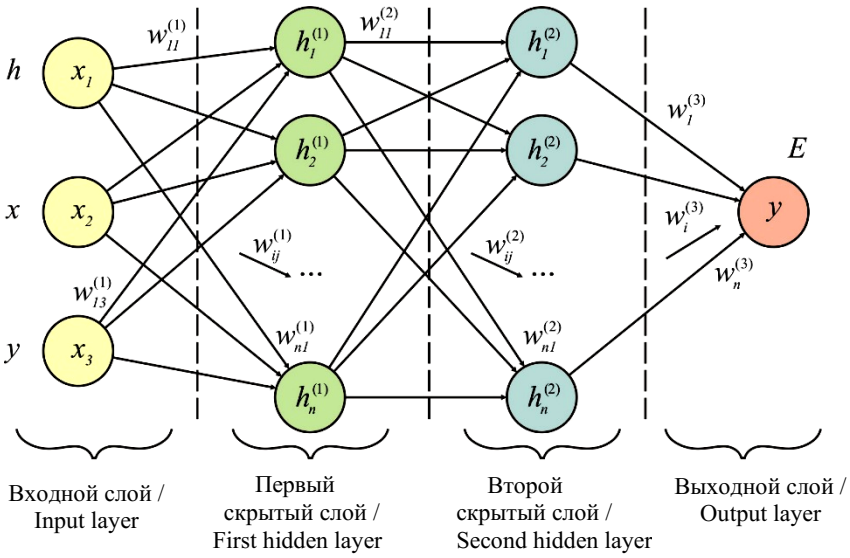


Рис. 3. ***Структура искусственной нейронной сети /***
Fig. 3. ***Structure of an artificial neural network***

С помощью метрики средней абсолютной ошибки (*Mean Absolute Error, MAE*) определяли насколько в среднем (по *n* примерам в тестовом наборе) предсказания (E_i^{pred}) отличаются от реальных значений (E_i^{true}):

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|E_i^{true} - E_i^{pred}\right| . \quad (2)$$

В качестве функции потерь принята средняя квадратичная ошибка (*Mean Squared Error, MSE*):

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(E_i^{true} - E_i^{pred})^2 . \quad (3)$$

Средняя ошибка предсказаний (*Mean Absolute Percentage Error, MAPE*) характеризует ошибку регрессии:

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{E_i^{true} - E_i^{pred}}{E_i^{true}}\right| 100\% . \quad (4)$$

Основные фрагменты кода на языке программирования Pyton с применением библиотек TensorFlow и Keras рассмотрены ниже.

```
# Создание модели ИНС
model = keras.Sequential([
    layers. Dense(32, activation='relu', input_shape=(X_train_scaled.shape[1],)),
    layers. Dense(32, activation='relu'),
    layers. Dense(1)  # Выходной слой (регрессия)])
```

Использован линейный стек слоёв (*Sequential*), где каждый слой имеет ровно один входной и один выходной тензор. Первый скрытый слой полносвязный (*Dense*): каждый его нейрон связан со всеми входами и всеми выходами. Количество нейронов в слое 32. Функция активации – *ReLU* (*Rectified Linear Unit*), формула для вычислений – $f(x) = max(0, x)$. Преимущества функции: устраняет проблему затухающих градиентов (по сравнению с *sigmoid/tanh*), вычислительно эффективна, придаёт нелинейность модели. Размерность входа задается для первого скрытого слоя. Последующие слои автоматически определяют свою входную размерность.

Второй скрытый слой имеет аналогичную первому архитектуру. Практика показывает, что использование одинакового количества нейронов в скрытых слоях часто работает хорошо. Выходной слой содержит один нейрон, т. к. предсказывается одно значение освещённости (*E*). Функция активации не используется, что позволяет модели предсказывать значения в любом диапазоне, решая задачу регрессии. Два скрытых слоя являются универсальным аппроксиматором (по теореме Цыбенко) [17] и подходят для большинства задач средней сложности. Принятые 32 нейрона на слой – разумный компромисс между скоростью обучения и мощностью модели. Функция *ReLU* является современным стандартом для скрытых слоёв и хорошо взаимодействует с оптимизатором *Adam* (*Adaptive Moment Estimation*).

```
# Компиляция модели
model.compile(optimizer='adam', loss='mse', metrics=['mae'])
```

Этот метод конфигурирует модель перед обучением, задавая способ оптимизации (т. е. как обновлять веса), функцию потерь (критерий качества модели) и метрики для мониторинга (дополнительные показатели). Оптимизатор *Adam* – современный алгоритмом оптимизации, учитывающий предыдущие градиенты для ускорения сходимости, адаптивно настраивающий скорости обучения (*learning rate*) для каждого параметра и эффективен при решении задач с регрессией. В коде оставлены параметры по умолчанию. Особенности принятой функции потерь *MSE*: сильно штрафует большие ошибки (квадратичная зависимость); оптимальна для задач регрессии с нормальным распределением ошибок; чувствительна к выбросам. Метрикой принята *MAE*, особенностями которой являются линейная чувствительность к ошибкам, более легкая интерпретируемость (это средняя абсолютная ошибка в единицах целевой переменной), меньшая чувствительность к выбросам. При компиляции создаётся вычислительный граф, инициализируются весовые параметры, настраивается механизм обратного распространения ошибки, подготавливаются структуры для отслеживания метрик.

```
# Обучение модели
history = model.fit(
    X_train_scaled, y_train,
    validation_data=(X_test_scaled, y_test),
    epochs=100,
    batch_size=16,
    verbose=1)
```

Итеративное обучение модели на данных производится методом fit(), который возвращает объект `history` с информацией о процессе обучения. Параметры обучения следующие. Входные данные: X_train_scaled – нормализованные признаки обучения (масштабированные *h, x, y*); y_train – целевые значения освещённости (*E*). На этих данных происходит прямое распространение и вычисление градиентов. Валидационные данные: X_test_scaled, y_test – контрольный набор для объективной оценки качества, который не участвует в обучении, а используется только для оценки. Он позволяет детектировать переобучение (когда val_loss растёт, а train_loss падает). Задано 100 эпох или итераций полного прохода по всем обучающим данным и размер Batch size (16), задающий количество образцов, обрабатываемых перед обновлением весов. Такое значение Batch size обеспечивает эффективную загрузку памяти и высокую скорость обработки без переполнения буфера в условиях обучения в среде Google Colab.

Задан уровень детализации вывода: прогресс-бар и метрики.

```
# Оценка модели
test_loss, test_mae = model.evaluate(X_test_scaled, y_test, verbose=0)
print(f"\nTest MAE: {test_mae:.2f}")
```

Метод evaluate() в ходе прямого распространения производит окончательную проверку качества модели на независимых тестовых данных, а также возвращает значения потерь *MSE* и метрики *MAE*.

```
# Предсказания на тестовых данных
y_pred = model.predict(X_test_scaled).flatten()
```

Метод predict() производит получение предсказаний модели для новых данных, использует уже обученную модель (когда веса зафиксированы) и работает в режиме inference (только прямое распространение). Метод автоматически обрабатывает батчи (даже для больших данных), возвращает numpy array с размерностью (n_samples, n_outputs) для регрессии с одним выходом – форма (n_samples, 1). Данные проходят через все слои сети: Нормализованные входы → Dense(32, relu) → Dense(32, relu) → Dense(1). На каждом слое производится умножение на матрицу весов, добавление смещения (*bias*), применение

активации (для скрытых слоёв). Выходной слой даёт предсказание освещённости *E*.

Предварительную обработку и визуализацию данных проводили в Excel. Для построения и обучения ИНС использовали облачную среду Google Colab, предоставляющую бесплатный доступ к вычислительным ресурсам (GPU/TPU).

Результаты и их обсуждение. Зависимости освещенности от координат на горизонтальной поверхности при различной высоте подвеса $E(h, x, y)$ показаны на рисунке 4. Полученные трехмерные графики визуализируют пространственное распределение освещенности.

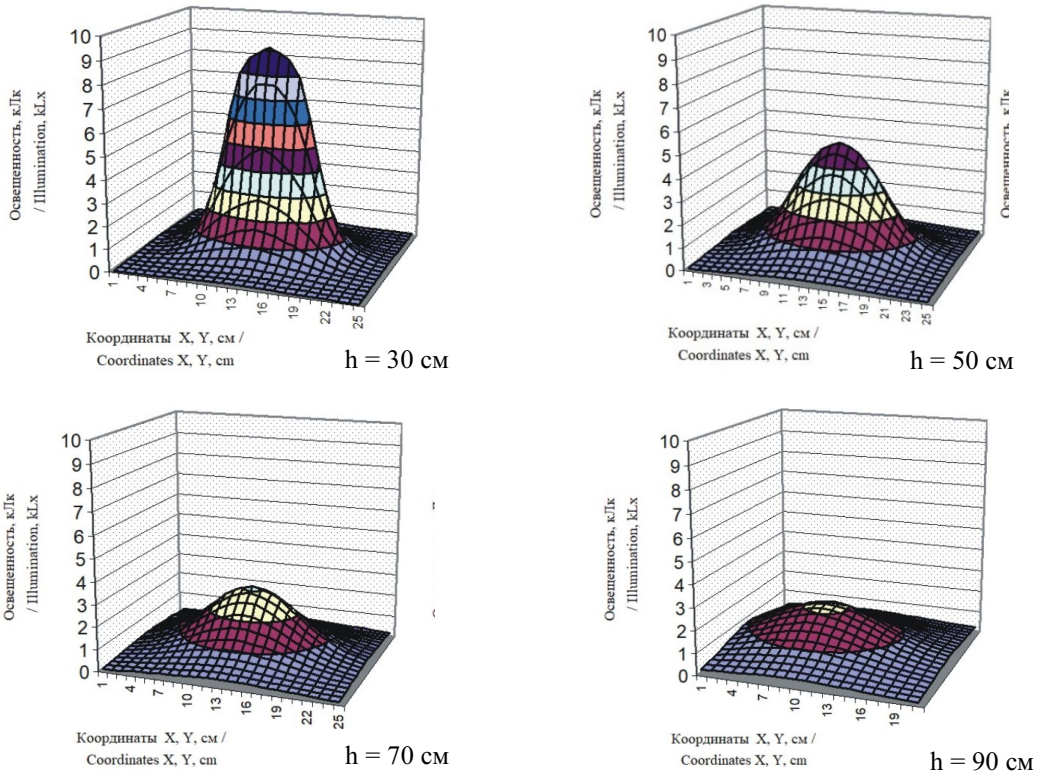


Рис. 4. **Зависимость освещенности от высоты подвеса и координат /**
Fig. 4. **Dependence of illumination on the suspension height and coordinates**

Анализ трехмерных графиков зависимости освещенности от координат при различных высотах подвеса фитооблучателя позволил выявить следующие закономерности. С увеличением высоты подвеса наблюдается расширение зоны освещения, однако максимальная освещенность в центральной области снижается, что согласуется с общими принципами распределения потока по поверхности. На малых высотах подвеса формируется выраженный локальный максимум освещенности непосредственно под фитооблучателем, тогда как при больших высотах распределение более равномерно. Графики демонстрируют симметричное убывание освещенности от центра к периферии, что соответствует классической модели источника света с аксиальной симметрией. Полученные зависимости позволяют определить оптимальную высоту подвеса фитооблучателя для заданных требований к создаваемой освещенности. Наблюдаемые минимальные значения освещенности в угловых зонах при практическом применении фитооблучателя указывают на необходимость корректировки их расположения или использования дополнительных источников света.

Зависимость максимальной освещенности от высоты подвеса фитооблучателя $E_{max}(h)$ показана на рисунке 5. Экспериментально установлено, что максимальная освещенность в точке проекции центра фитооблучателя убывает с увеличением высоты подвеса h по степенному закону.

Степенной характер убывания освещенности $E_{\max} \sim h^{-1,3}$ (рис. 5) отличается от классического закона обратных квадратов $E_{\max} \sim h^{-2}$, характерного для точечного источника света

в свободном пространстве, показателем степени при h. Высокое качество аппроксимации (R^2 = 0,99) свидетельствует о хорошем соответствии степенной модели экспериментальным данным. Различие в показателях степени указывает на отклонение от закона обратных квадратов, вызванное тем, что на исследуемых высотах при габаритах фитооблучателя его нельзя считать точечным источником. Применение простых формул в данном случае невозможно и объясняет необходимость привлечения математического аппарата нейронных сетей.

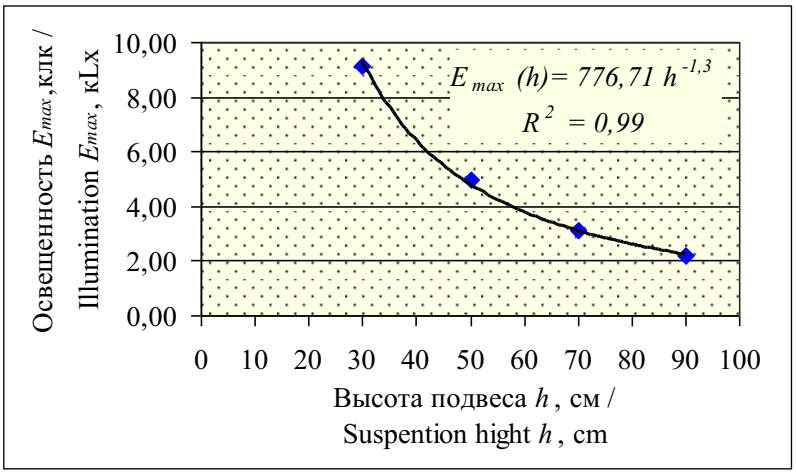


Рис. 5. **Зависимость максимальной освещенности от высоты подвеса /**
Fig. 5. **Dependence of maximum illumination on suspension height**

На рисунке 6 представлены графики обучающих и валидационных потерь при работе ИНС, построенные в координатах: горизонтальная ось – номер эпохи (итерации полного прохода по данным); вертикальная ось – значение функции потерь *MSE*. Графики показывают динамику изменения ошибки модели в процессе обучения.

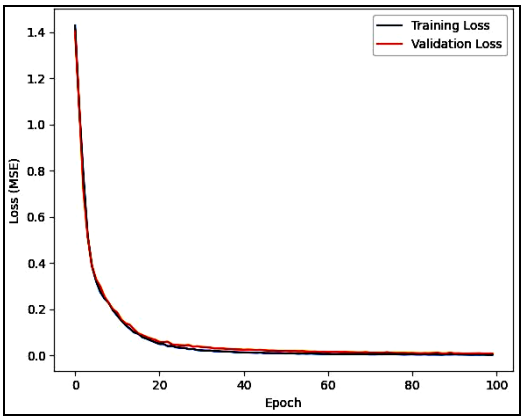


Рис. 6. **Обучающая и валидационная потери /**
Fig. 6. **Training and validation loss**

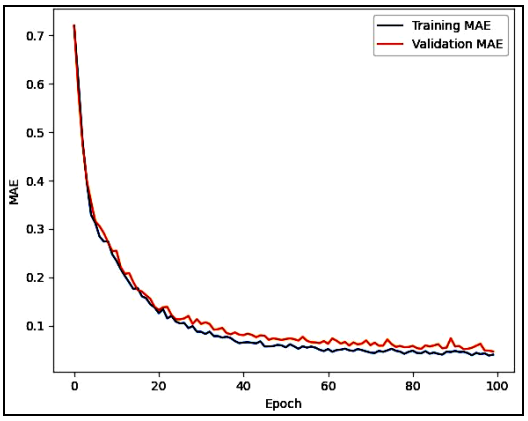


Рис. 7. **Обучающая и валидационная ошибки /**
Fig. 7. **Training and validation MAE**

Форма построенных по результатам работы ИНС графиков обучающих и валидационных потерь типична для успешного обучения, когда наблюдается быстрое уменьшение потерь в начальных эпохах и далее происходит постепенное выравнивание кривых с приближением к минимуму, что указывает на сходимость. Данные графиков свидетельствуют о том, что модель не переобучается (*validation loss* не начинает расти), данные хорошо разделены (нет существенной утечки информации), принятая модель адекватна сложности задачи. Почти полное совпадение кривых говорит о том, что модель хорошо обобщает данные.

На рисунке 7 представлены графики обучающей и валидационной ошибки. Средняя абсолютная ошибка *MAE* = 0,04 клк. Форма графиков говорит о быстром улучшении точности в начальных эпохах, происходит постепенное приближение к оптимальной точности, что типично для успешно обучающейся модели.

Видны микроколебания в процессе тонкой настройки весов, что свойственно для стохастических оптимизаторов (таких, как *Adam*).

Разница в графиках обучающей и валидационной ошибок в пределах 5–15 % характерна для хорошо сбалансированных моделей. Резкий спад *MAE* в начальные эпохи говорит о том, что модель быстро усваивает основные закономерности. Совпадение кривых показывает, что модель одинаково хорошо работает на тренировочных и валидационных данных. В средней фазе модель переходит к тонкой настройке. Появляющееся различие между кривыми является естественным следствием обучения на тренировочных данных и признаком здорового баланса между обучением и обобщением.

На рисунке 8 фактические значения (*True Values*) сопоставляются с предсказанными (*Predicted Values*).

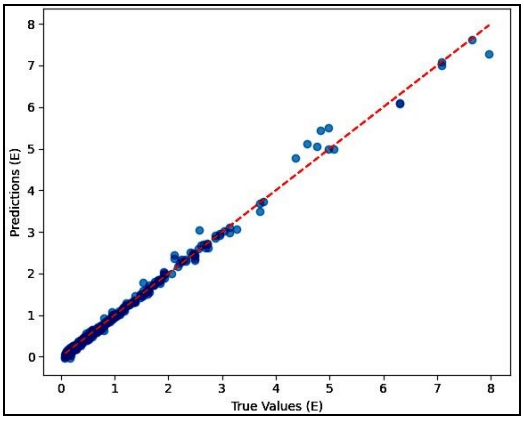


Рис. 8. **Сопоставление фактических и предсказанных значений /**
Fig. 8. **True vs predicted values**

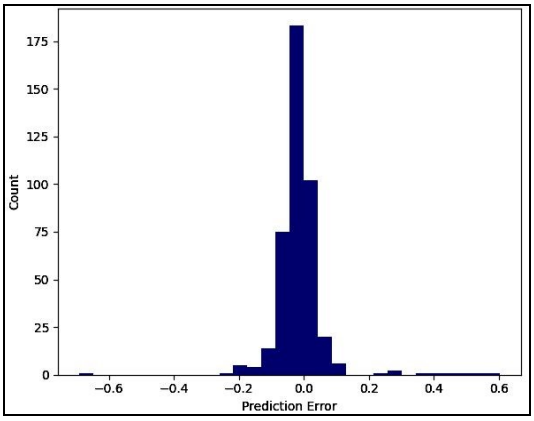


Рис. 9. **График распределения ошибок предсказания /**
Fig. 9. **Prediction error distribution**

График распределения ошибок предсказания приведен на рисунке 9. Форма распределения представляет собой узкий симметричный пик, свидетельствующий о нормальном распределении (как и ожидается для *MSE*), максимальная частота ошибок около нуля, быстрое убывание частоты при удалении от центра.

Большинство точек плотно группируется у диагональной линии, что свидетельствует о хорошей точности предсказаний модели. Концентрация точек наиболее высока в начале координат графика (небольшие значения освещенности) и постепенно уменьшается по мере удаления от него. Причина – бóльшее количество примеров с низкими значениями освещенности в исходных данных (см. визуализацию на рис. 4). Следствием тому являются минимальные ошибки в области малых значений освещенности. Тем не менее модель успешно решает поставленную задачу, а неравномерность распределения точек скорее отражает особенности данных, чем проблемы модели.

Судя по графику распределения ошибок предсказания, большинство предсказаний достаточно точны. Диапазон ошибок ограничен интервалом от -0,2 до 0,2, что указывает на хорошую точность модели в абсолютных величинах. Симметрия графика говорит об отсутствии систематического смещения (*under/over-prediction*). Это хорошо согласуется с другими метриками: низким значением *MAE* на валидационной выборке и соответствием данных на графике *True vs Predicted*. Распределение ошибок указывает на качественную модель, работающую в рамках ожиданий для задач регрессии. Узкий диапазон ошибок и симметричность распределения подтверждают адекватность выбранной архитектуры и процесса обучения.

Результаты моделирования показали, что архитектура ИНС подобрана достаточно удачно (2 слоя по 32 нейрона с *ReLU*). В условиях простой физически определенной закономерности формирования величины освещенности в трехмерной системе координат, низкого уровня шума в измерениях, применение нормализации, использование минимизирующей крупные ошибки метрики *MSE* удалось добиться *MAE* = 0,04 клк, что является неплохим результатом на уровне погрешности и воспроизводимости измерений люксметром. Набор параметров компиляции представляет собой сбалансированный выбор для большинства задач регрессии средней сложности, что подтверждается хорошими результатами

на графиках обучения. Параметры обучения модели соответствуют поставленной задаче – модель достигла сходимости без признаков переобучения, несмотря на относительно небольшой объем датасета (2100) по сравнению с количеством определяемых весов у нейронов (1217, по слоям: первый скрытый 32(3 + 1) = 128, второй скрытый 32(32 + 1) = 1056, выходной 1(32 + 1) = 33). Принятый метод оценки модели даёт объективную оценку качества модели на независимых данных, что критически важно для доверия к результатам. В программном коде использованы лучшие практики, обеспечивающие четкое и эффективное выполнение поставленной задачи.

Значение коэффициента детерминации нейросетевой модели составляет R^2 = 0,9967 с 95%-м доверительным интервалом [0,09953, 0,9977], что является хорошим результатом. Значение *MAPE* составляет 7,5 %, эта величина может быть улучшена путем регуляризации и аугментации данных. С учетом реальных условий точность модели можно считать приемлемой.

Заключение. Трехмерная визуализация освещенности подтверждает значимое влияние высоты подвеса на пространственное распределение света и предоставляет практический инструмент для проектирования осветительных систем. Дальнейшие исследования могут быть направлены на учет многократных отражений и спектральных характеристик источников света. Полученная степенная зависимость максимальной освещенности от высоты хорошо описывает экспериментальные данные и отражает особенности реального фитооблучателя, который не может быть принят за точечный источник, распределение освещенности от которого описывается законом обратных квадратов. Указанное обстоятельство затрудняет применение традиционных методов расчета и объясняет необходимость привлечения математического аппарата ИНС.

Найденные параметры ИНС позволяют определить значение освещенности от фитооблучателя при любой комбинации высоты подвеса и координат расчетной точки на плоскости, что может быть использовано для инженерных расчетов при проектировании облучательной установки в светокультуре на базе испытываемого фитооблучателя. Разработанная методика после переобучения сети на новых данных позволяет проводить расчеты фитооблучателей произвольных размеров и конструктивных решений.

Список литературы

1. Панарин В. М., Гришаков К. В., Маслова А. А., Гришакова О. В., Архипов А. В. Применение искусственных нейронных сетей в инженерно-технических и экологических разработках. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022;(4):278–284. DOI: https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-4-278-284 EDN: WDNKXE

2. Кутырёв А. И., Филиппов Р. А. Применение сверточной нейронной сети для мониторинга состояния земляники садовой. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(4):685–696. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.4.685-696 EDN: EZQZKS

3. Черепенин В. А., Кацупеев А. А. Анализ подходов к созданию системы «Умная теплица» на основе нейронной сети. Программные системы и вычислительные методы. 2024;(1):68–78. DOI: https://doi.org/10.7256/2454-0714.2024.1.69794 EDN: XAZVOW

4. Смирнов А. В., Тищенко И. П. Применение Сиамских нейронных сетей для классификации биомассы растений по визуальному состоянию. Программные системы: теория и приложения. 2024;15(3(62)):53–74. DOI: https://doi.org/10.25209/2079-3316-2024-15-3-53-74 EDN: RATGTW

5. Воробьев Н. И., Лысов А. К., Корнилов Т. В., Хютти А. В. Вычислительная нейросеть для обработки светоотражательных спектров растений и дистанционного фитосанитарного мониторинга картофеля. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(2):283–292. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.2.283-292 EDN: KUSISD

6. Сорокин М. И. Использование свёрточных нейронных сетей для классификации видов искусственного освещения. Аллея науки. 2018;3(6(22)):1008–1011. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=35326748 EDN: XULOAP

7. Lork C., Cubillas M., Kiat Ng B. K., Yuen C., Tan M. Minimizing Electricity Cost through Smart Lighting Control for Indoor Plant Factories. IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2020. DOI: https://doi.org/10.1109/iecon43393.2020.9255061

8. Ерсой Йылмаз А., Розовский Е. И. Нейросетевое моделирование зависимости цветовой температуры освещения от источника света и оптической системы светильника. Светотехника. 2017;(1):49–54. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=28777660 EDN: YFTHAT

9. Kazanasmaz T., Günaydin M., Binol S. Artificial neural networks to predict daylight illuminance in office buildings. Building and Environment. 2009;44(8):1751–1757. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.11.012

10. Dudzik M., Dechnik M., Furtak M. Application of neural networks to lighting systems. MATEC Web of Conferences. 2019;282(2):02069. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201928

11. Бородулин Д. М., Шафрай А. В., Максименко А. А. Применение нейронной сети для управления системой домашней гидропоники. Техника и технология пищевых производств. 2023;53(2):384–395. DOI: https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2440 EDN: THVKNB

12. Zhang Y., Li S. Study on Illumination Measurement Method of Lighting Environment Based on RBF Neural Network. Journal of Physics: Conference Series. 2022;2196(1):012004. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/2196/1/012004

13. Семенова Н. Г., Валиуллин К. Р. Интеллектуальная система энергоэффективного управления уличным освещением на основе нейросетевых технологий. Вестник Оренбургского государственного университета. 2015;(4(179)):183–188. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=24097618 EDN: UHINQP

14. Егоров А. Д., Павлюченко Д. А. Применение искусственных нейронных сетей при проектировании электрического освещения. Энергетик. 2020;(11):21–25. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=44236455 EDN: MGYYVH

15. Ракутько С. А., Ракутько Е. Н. Оценка равномерности поверхностного распределения потока излучения как фактора энергоэффективности светокультуры. Инженерные технологии и системы. 2021;31(3):470–486. DOI: https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.470-486 EDN: XLLAUS

16. Ракутько С. А., Ракутько Е. Н., Васькин А. В. Влияние компоновочных параметров облучательной установки на энергоэкологичность светокультуры. АгроЭкоИнженерия. 2021;(3(108)):33–51. DOI: https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-3108-33-50 EDN: RHFSXY

17. Галкин В. А., Гавриленко Т. В., Смородинов А. Д. Некоторые аспекты аппроксимации и интерполяции функций искусственными нейронными сетями. Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2022;38(1):54–73. DOI: https://doi.org/10.26117/2079-6641-2022-38-1-54-73 EDN: JTZQQZ

References

1. Panarin V. M., Grishakov K. V., Maslova A. A., Grishakova O. V., Arkhipov A. V. Application of artificial neural networks in engineering and environmental developments. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. 2022;(4):278–284. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-4-278-284

2. Kutyrev A. I., Filippov R. A. Application of convolutional neural network for monitoring the condition of strawberries. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(4):685–696. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.4.685-696

3. Cherepenin V. A., Katsupeyev A. A. Analysis of approaches to creating a "Smart greenhouse" system based on a neural network. *Programmniye sistemi i vichislitelniye metodi* = Software Systems and Computational Methods. 2024;(1):68–78. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.7256/2454-0714.2024.1.69794

4. Smirnov A. V., Tishchenko I. P. Application of siamese neural networks to classify plant biomass by visual state. *Programmniye sistemi: teoriya i prilozheniya* = Program Systems: Theory and Applications. 2024;15(3(62)):53–74. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.25209/2079-3316-2024-15-3-53-74

5. Vorobyov N. I., Lysov A. K., Kornilov T. V., Hyutti A. V. Computational neural network for processing light-reflective spectra of plants and remote phytosanitary monitoring of potatoes. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(2):283-292. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.2.283–292

6. Sorokin M. I. Using convolutional neural networks to classify types of artificial lighting. *Alleya nauki*. 2018;3(6(22)):1008–1011. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=35326748

7. Lork C., Cubillas M., Kiat Ng B. K., Yuen C., Tan M. Minimizing Electricity Cost through Smart Lighting Control for Indoor Plant Factories. IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2020. DOI: https://doi.org/10.1109/iecon43393.2020.9255061

8. Yersoy Yilmaz A., Rozovsky E. I. Neural network modeling of the dependence of the color temperature of lighting on the light source and the optical system of the lamp. *Svetotekhnika* = Light & Engineering. 2017;(1):49–54. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=28777660

9. Kazanasmaz T., Günaydin M., Binol S. Artificial neural networks to predict daylight illuminance in office buildings. Building and Environment. 2009;44(8):1751–1757. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.11.012

10. Dudzik M., Dechnik M., Furtak M. Application of neural networks to lighting systems. MATEC Web of Conferences. 2019;282(2):02069. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201928

11. Borodulin D. M., Shafray A. V., Maksimenko A. A. Neural network and home hydroponics. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevikh proizvodstv* = Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(2):384–395. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2440

12. Zhang Y., Li S. Study on Illumination Measurement Method of Lighting Environment Based on RBF Neural Network. Journal of Physics: Conference Series. 2022;2196(1):012004. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/2196/1/012004

13. Semenova N. G., Valiullin K. R. Intelligent energy-efficient street lighting control system based on neural network technology. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta* = Vestnik of the Orenburg State University. 2015;(4(179)):183–188. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=24097618

14. Egorov A. D., Pavlyuchenko D. A. Design of electric lighting using artificial neural networks. *Energetik*. 2020;(11):21–25. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=44236455

15. Rakutko S. A., Rakutko E. N. Assessment of lighting uniformity as a factor of energy efficiency in greenhouse horticulture. *Inzhenerniye tekhnologii i sistemi* = Engineering Technologies and Systems. 2021;31(3):470–486. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.470-486

16. Rakutko S. A., Rakutko E. N., Vaskin A. V. Effect of lighting fixtures spatial arrangement on energy and ecological performance of greenhouse horticulture. *AgroEkoInzheneriya* = AgroEcoEngineering. 2021;(3(108)):33–51. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24412/2713-2641-2021-3108-33-50

17. Galkin V. A., Gavrilenko T. V., Smorodinov A. D. Some aspects of approximation and interpolation of functions artificial neural networks. *Vestnik KRAUNTs. Fiziko-matematicheskiye nauki* = Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences. 2022;38(1):54–73. (In Russ.).
DOI: https://doi.org/10.26117/2079-6641-2022-38-1-54-73

Вклад авторов: Ракутько С. А. – концепция и план исследования, анализ данных. Ракутько Е.Н. – анализ данных, подготовка рукописи.

Сведения об авторах

✉ **Ракутько Сергей Анатольевич**, доктор техн. наук, доцент, главный научный сотрудник отдела агроэкологии в животноводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Фильтровское ш., д. 3, п. Тярлево, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196634, e-mail: nii@sznii.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2454-4534, e-mail: sergej1964@yandex.ru

Ракутько Елена Николаевна, научный сотрудник отдела агроэкологии в животноводстве, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Фильтровское ш., д. 3, п. Тярлево, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196634, e-mail: nii@sznii.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3536-9639**

Author contributions: Rakutko S. A. – research plan and concept, data analysis. Rakutko E. N. – data analysis, preparation of the manuscript.

Information about the authors

✉ **Sergei A. Rakutko,** DSc in Engineering, associate professor, chief researcher, the Department of Agroecology in Livestock Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 3, Filtrovskoje Shosse, Tyarlevo settlement, Saint Petersburg, Russian Federation, 196634, e-mail: nii@sznii.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2454-4534**,
e-mail: sergej1964@yandex.ru

Yelena N. Rakutko, researcher, the Department of Agroecology in Livestock Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 3, Filtrovskoje Shosse, Tyarlevo settlement, Saint Petersburg, Russian Federation, 196634,
e-mail: nii@sznii.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3536-9639**

✉ – Для контактов / Corresponding author

https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.504–517
УДК 631.1:519.876.5

Формирование рациональных структур технологических систем в природообустройстве с помощью агентного имитационного моделирования

© 2026. О. Н. Дидманидзе[1], Е. П. Парлюк[2], А. И. Новиченко[1]✉
[1] *ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация,*
[2] *ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Российская Федерация*

В природообустройстве актуальной задачей остается разработка научно-методического подхода к проектированию и оптимизации технологических систем. В основе предлагаемого подхода лежит интеграция онтологического проектирования и агентного имитационного моделирования, где интеграция обеспечивает связь между абстрактным описанием и вычислительным экспериментом. Объектами исследования выступали технологические процессы реконструкции напорного трубопровода в закрытой оросительной сети. Именно здесь, при явном недостатке статистических данных, имитационное моделирование становится основным инструментом исследования, которое позволяет изучать возможные производственные сценарии и проводить оптимизацию без масштабных натурных экспериментов. Вместе с тем существует риск расхождения модельных результатов с реальными показателями. Причина такого расхождения кроется в сложности полноценного учета организационно-технологических факторов, где каждый фактор может вносить нелинейные искажения в итоговые оценки. Снять указанное ограничение помогает агентный подход: именно он даёт возможность детально анализировать поведение отдельных компонентов и характер их взаимодействия, а также гибко подстраиваться под меняющиеся условия. К числу ключевых этапов построения такой модели относятся онтологическое описание возможных структур комплексов и определение функциональных связей между активными элементами и локальными процессами – с обязательным учётом условий эксплуатации оборудования. В рамках исследования разработан соответствующий инструментарий, с помощью которого удаётся решать задачи разного уровня сложности и масштабности. Предложен комплексный методологический подход, позволяющий последовательно интегрировать этапы онтологического описания предметной области, формализации функционально-технологических связей и агентного моделирования для задач проектирования технологических систем в природообустройстве. Эффективность предлагаемого подхода апробирована на реальном процессе реконструкции закрытой оросительной системы, предложена Парето-оптимальная область поиска рациональных структур технологических систем.

Ключевые слова: *агентное моделирование, технологический комплекс машин, гидромелиорация, техноприродные системы, водохозяйственный комплекс, ресурсоэффективные технологии, метод Монте-Карло*

Благодарности: работа выполнена без финансового обеспечения в рамках инициативной тематики.
Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Дидманидзе О. Н., Парлюк Е. П., Новиченко А. И. Формирование рациональных структур технологических систем в природообустройстве с помощью агентного имитационного моделирования. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2026;27(2):504–517. DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.504-517

Поступила в редакцию: 05.12.2025 Принята к публикации: 08.04.2026
Поступила после рецензирования: 27.03.2026 Опубликована онлайн: 27.04.2026

Formation of rational structures of technological systems in environmental management using agent-based simulation modeling

© 2026. Otari N. Didmanidze[1], Ekaterina P. Parlyuk[2], Anton I. Novichenko[1]✉
[1]*Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation,*
[2]*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation*

In environmental management, developing a scientific and methodological approach to the design and optimization of technological systems remains a pressing issue. The proposed approach is based on the integration of ontological design and agent-based simulation modeling, where this integration provides a link between abstract description and computational experimentation. The objects of study were the technological processes of reconstructing a pressure pipeline in a closed irrigation network. It is here, with the obvious lack of statistical data, that simulation modeling becomes a key research tool. It allows for the exploration of possible production scenarios and optimization without large-scale field experiments. However, there is a risk of discrepancies between model results and actual indicators. The reason for this discrepancy lies in the difficulty of fully accounting for organizational and technological factors, each of which can introduce nonlinear distortions into the final

estimates. An agent-based approach helps overcome this limitation: it enables detailed analysis of the behavior of individual components and the nature of their interactions, as well as flexible adaptation to changing conditions. Key stages in constructing such a model include an ontological description of possible complex structures and the definition of functional relationships between active elements and local processes, all while taking into account the equipment's operating conditions. As part of the study, a corresponding toolkit was developed that could be used to solve problems of varying complexity and scale. A comprehensive methodological approach is proposed that allows for the consistent integration of the stages of ontological description of a subject area, formalization of functional-technological relationships, and agent-based modeling for designing technological systems in environmental management. The effectiveness of the proposed approach was tested on a real process of reconstruction of a closed irrigation system, and a Pareto-optimal search region for rational structures of technological systems was proposed.

Keywords: *agent-based modeling, technological machinery complex, land reclamation and water management, techno-natural systems, water management complex, resource-efficient technologies, Monte Carlo method*

Acknowledgements: the research was carried out without financial support within initiative theme.
The authors thank the reviewers for their contribution to the expert evaluation of this work.

Conflict of interest*:* the authors stated that there was no conflict of interest.

For citation: Didmanidze O. N., Parlyuk E. P., Novichenko A. I. Formation of rational structures of technological systems in environmental management using agent-based simulation modeling. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2026;27(2):504–517. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.30766/2072-9081.2026.27.2.504-517

Received: 05.12.2025
Received: 27.03.2026
Accepted for publication: 08.04.2026
Published online: 27.04.2026

В современных условиях эксплуатации технологических систем в области природообустройства [1] возникает необходимость в эффективных методах управления при ограниченных ресурсах [2]. Обеспечение оптимальной работы таких систем требует глубокого понимания их структурных особенностей и динамических характеристик[1]. Однако сложности учета уникальных особенностей каждого объекта и недостаток статистических данных затрудняют применение традиционных методов моделирования, что обусловливает необходимость внедрения альтернативных подходов [3].

Классические подходы, опирающиеся на усредненные статистические данные и укрупненные математические модели, часто не способны адекватно отразить динамику реальных процессов, где ключевую роль играют локальные взаимодействия между участниками процесса, человеческий фактор, изменчивость внешних условий [4]. Это приводит к значительному несоответствию между проектируемыми и фактическими показателями эффективности технологических систем, росту рисков и неоптимальному использованию ограниченных ресурсов [5].

В этой связи актуальность настоящего исследования обусловлена острой производственной необходимостью в применении методологии синтеза эффективных технологических систем, которая позволила бы:

- преодолевать проблему «черного ящика» классических имитационных моделей за счет явного описания особенностей поведения и логики взаимодействия каждого активного элемента системы;
- проектировать адаптивные и устойчивые производственно-технологические системы, способные эффективно функционировать при изменении внешних и внутренних условий;
- проводить оптимизацию структуры технологических систем в условиях глубокой неопределенности и дефицита данных, исключая дорогостоящие и длительные натурные эксперименты.

Использование агентного подхода (*Agent-Based Modeling*) представляется наиболее перспективным путем решения подобных задач, так как он позволяет декомпозировать сложную систему на интеллектуальные автономные элементы (агенты), наделенные правилами поведения, изучать эмерджентные свойства системы, возникающие в результате их взаимодействия, и перейти к концепции цифровых двойников [6, 7].

Однако вопрос применения методологии функционального моделирования онтологической структуры технологических систем, используемой в парадигме агентного моделирования, остается малоизученным и достаточно перспективным инструментом для использования в отраслевых системах поддержки принятия решений [7].

[1]Р50.1.028–2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. М.: Изд-во стандартов, 2001. 54 с.
URL: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293850/4293850833.pdf

Цель исследования – разработать научно-методический подход к проектированию и оптимизации эффективных технологических систем в природообустройстве (на примере реконструкции закрытой оросительной сети) на основе интеграции онтологического проектирования и агентного имитационного моделирования.

Задачи исследования:

1. Выполнить онтологическое описание технологического процесса реконструкции закрытой оросительной сети с учетом условий реализации и назначения вида технологических машин на отдельных операциях.

2. Построить агентную имитационную модель технологической системы в природообустройстве на примере работ по реконструкции закрытой оросительной сети.

3. Реализовать множественный компьютерный эксперимент на агентной имитационной модели технологической системы в природообустройстве.

Научная новизна – исследование вносит вклад в теорию имитационного моделирования сложных организационно-технологических систем, предлагая практически применимый инструментарий для перехода от реактивного к проактивному и адаптивному управлению ресурсами в стратегически важной и чувствительной к изменениям сферы природообустройства.

Материал и методы. Основным инструментом для исследования и оптимизации технологических систем становится имитационное моделирование, позволяющее исследовать сценарии функционирования без проведения дорогостоящих экспериментов[2]. Тем не менее, традиционные модели часто показывают значительные расхождения с реальной работой технологических систем из-за сложности учета организационно-технологических особенностей, действующих факторов и особенностей взаимодействия элементов описываемой системы [5].

Для устранения этих ограничений принято решение применить агентный подход к процессу формирования имитационной модели, основанный на принципе «снизу вверх». Этот подход позволяет формировать модели, детально анализируя поведение каждого элемента, технологического звена и их взаимодействий. Важными этапами являются создание онтологических описаний возможных вариантов структур и определение функциональных связей между элементами систем с учетом условий эксплуатации и их эксплуатационных параметров [8, 9].

С точки зрения проектирования сложных производственных систем, использование мультиагентных технологий дает возможность отказаться от классического подхода к моделированию, основанного на едином сложном алгоритме, в пользу множества простых взаимодействующих алгоритмов агентов [10]. Ключевым преимуществом такой архитектуры является декомпозиция программного кода, что приводит к существенному повышению скорости выполнения вычислительных операций в ходе симуляции, а также возможности введения в вычислительный процесс дополнительных агентов или осуществлять перебор вариантов элементов системы.

Использование агентного моделирования способствует выявлению ключевых зависимостей и особенностей поведения элементов системы, что содействует формированию рациональной структуры технологического комплекса. В результате агентного имитационного моделирования достигается максимальное раскрытие потенциала системы при минимальных ресурсных затратах [11].

Проведенный анализ структуры и свойств ключевых параметров технологического процесса создает необходимые предпосылки для построения мультиагентной имитационной модели [12].

Разработка подобной модели должна опираться на ряд фундаментальных методологических принципов:

1. Модель представляет собой совокупность агентов.

2. Агент обладает набором свойств, аналогичных наиболее важным свойствам реального объекта.

3. Имеется набор правил, характеризующих взаимодействия агентов между собой и окружением.

Существенным преимуществом предлагаемой методики разработки имитационных моделей является создание уникального динамического кода, который придает системе ключевое свойство адаптивности [13].

[2]Анисимов А. В., Горностаев В. И., Новиченко А. И., Подхватилин И. М. Обоснование рациональных параметров технологических процессов в мелиоративном строительстве с использованием имитационного моделирования. Мат-лы Международ. научн. конф. молодых учёных и специалистов, посвящ. 160-летию В. А. Михельсона, Москва, 09–11 июня 2020 года. М.: РГАУ – МСХА им. К. А. Тимирязева, 2020. Т. 2. С. 381–385.

Таким образом, система приобретает черты интеллектуального инструмента, способного не только отражать, но и адаптироваться к изменчивым условиям, что закладывает основу для создания цифровых двойников, пригодных для оперативного анализа текущей ситуации и поддержки принятия решений в условиях неопределенности [14, 15].

Данный регламентированный подход обладает рядом ключевых преимуществ:

- *комплексность*: методика охватывает все стадии работы, обеспечивая целостность и непротиворечивость конечной модели;

- *структурированность*: четкая последовательность этапов минимизирует ошибки проектирования и позволяет системно управлять процессом разработки;

- *воспроизводимость*: формализация правил гарантирует, что различные исследователи, применяя методику к одной системе, придут к сопоставимым результатам, что является критерием научной обоснованности.

Результаты и их обсуждение. Графическое представление полного цикла экспериментальных работ, согласно предлагаемой методике (ее основные стадии, входные/выходные этапы и точки принятия решений), приведено на рисунке 1.

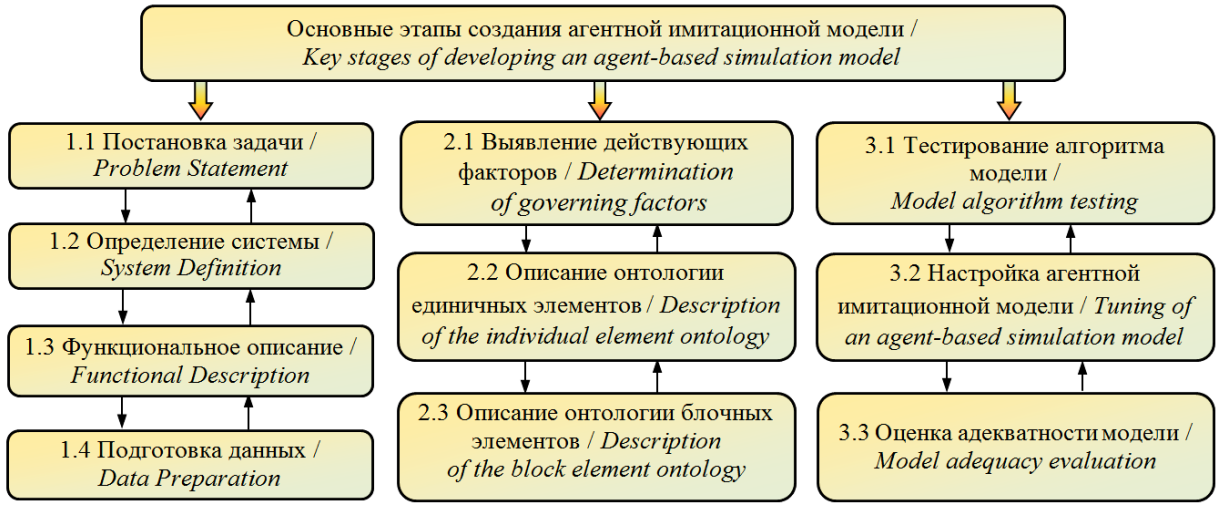


Рис. 1. **Этапы создания агентной имитационной модели технологического процесса реконструкции закрытой оросительной сети /**

Fig. 1. **Development stages of an agent-based simulation model for closed irigation network reconstruction**

Процедура создания агентной имитационной модели для технологической системы реконструкции закрытых оросительных сетей может быть представлена в виде следующих основных этапов[3]:

1.1. *Постановка задачи.* На этапе постановки задачи формируется фундамент всего исследования, благодаря чему обеспечивается его практическая направленность и измеримость результатов. Здесь соблюдаются несколько важных принципов.

Конкретизация критериев: определяемые показатели снабжаются чёткими алгоритмами расчёта внутри модели (применительно к реконструкции закрытой оросительной сети это не абстрактная «эффективность», а, скажем, коэффициент равномерности полива либо удельные энергозатраты на единицу орошаемой площади).

Учёт ограничений: с опорой на специфику условий формализуются все ограничивающие факторы (лимиты финансирования, сроки выполнения работ, доступность техники), которые напрямую влияют на пространство возможных решений.

Связь с валидацией: установленная система показателей в дальнейшем превращается в основу для проверки адекватности модели – именно с ней сравниваются результаты имитации.

[3]Подхватилин И. М., Горностаев В. И., Новиченко А. И. Этапы создания имитационной модели технологической системы с применением мультиагентных технологий. Мат-лы Международ. научн. конф. молодых учёных и специалистов, посвящ. 150-летию А. В. Леонтовича, г. Москва, 3-6 июня 2019 г. М.: РГАУ-МСХА, 2019. С. 501–506.

Ключевая цель данного этапа заключается в трансформации общей идеи исследования в формализованный набор требований и критериев. Благодаря этому процесс моделирования становится управляемым, а его итоги – верифицируемыми. Этап предполагает чёткое определение целей моделирования и установление системы основных технико-экономических показателей, которые описывают результаты процесса реконструкции. Определение показателей ведётся на основе всей совокупности доступных исходных данных с учётом специфики заданных производственных и ресурсных условий. Адекватность достигается за счёт последовательной детализации – от концептуального описания системы к формализации состояний, событий и переходов для каждого агента. Созданная структурная модель служит тем самым «скелетом», на который впоследствии наращивается алгоритмическая и математическая логика, то есть знаменует переход к этапу параметризации и программирования агентного поведения.

1.2. *Определение системы.* Формализация контекстных границ системы происходит на шаге определения системы. Именно здесь идентифицируются и фиксируются экзогенные факторы вместе с неизменяемыми условиями, потому что они выступают в роли заданных ограничений для всей последующей разработки модели. К таким условиям относятся гидрогеологическая обстановка, климатические характеристики и действующее законодательство. В обеспечении адекватности имитации реальной эксплуатационной обстановки учет этих факторов становится обязательным, где любое упущение ведет к искажению результатов. На практике это означает выявление всех внешних по отношению к управлению процессом факторов. Замкнутый цикл «моделирование – анализ – принятие решений» обслуживается данным функционалом, потому что именно он связывает внешнюю среду с внутренней логикой модели.

Ярким примером является работа на пойменных землях, где ключевым нерегулируемым параметром выступает высокий уровень грунтовых вод. В соответствии с агротехническими и экологическими нормативами это накладывает жёсткое ограничение: траншея не может оставаться открытой продолжительное время. Нарушение данного условия моделирует в системе негативный сценарий – обводнение и заболачивание, что приводит к дополнительным потерям рабочего времени и непроизводительному расходу ресурсов.

Производительность при производстве земляных работ также зависит от особенностей грунтовых и территориальных условий. При проектировании данная зависимость формализуется и принимается во внимание с использованием коэффициента наполнения ковша землеройных машин.

1.3. *Функциональное описание.* Цель этапа – выявить и документировать причинно-следственные связи и потоки между компонентами системы. Применение нотации IDEF0[4] позволяет наглядно отобразить, какие входные данные (ресурсы, информация) необходимы для выполнения каждой функции, какие результаты она производит, что ею управляет (технология, нормативы) и какие механизмы (оборудование, персонал) задействованы. Полученные диаграммы являются «дорожной картой» для программирования логики агентов.

На начальном этапе была сформулирована функциональная модель технологического процесса реконструкции закрытой оросительной сети. На линейно-протяженных объектах это, как правило, зацикленная модель, реализующая основные операции на локальных участках сооружения – «захватках». В упрощенном виде и для удобства восприятия технологический процесс можно представить в виде сгруппированных технологических операций в технологические блоки (рис. 2).

Отличительной особенностью предложенной функциональной модели технологического процесса является разделение на контуры параллельных потоков с различной интенсивностью, которые непрерывно циркулируют в замкнутом цикле алгоритма описания моделируемых технологических блоков, внутри которых также закладывается логика непрерывного циркулирования технологических операций.

Финальным звеном в контуре моделирования выступает интеграция его результатов в экспертно-аналитическую среду. Для этого необходима реализация специализированного шлюза, который обеспечит автоматический сбор сырых выходных данных симуляции, их агрегацию и преобразование в структурированный формат, пригодный для загрузки в базу знаний справочно-информационного модуля. Данный функционал служит ключом к замкнутому циклу «моделирование – анализ – принятие решений».

[4]Черемных С. В., Семенов И. О., Ручкин В. С. Структурный анализ систем: IDEF-технологии: практикум. М.: Финансы и статистика, 2006. 192 с. URL: https://pqm-online.com/assets/files/lib/books/cheremnykh.pdf

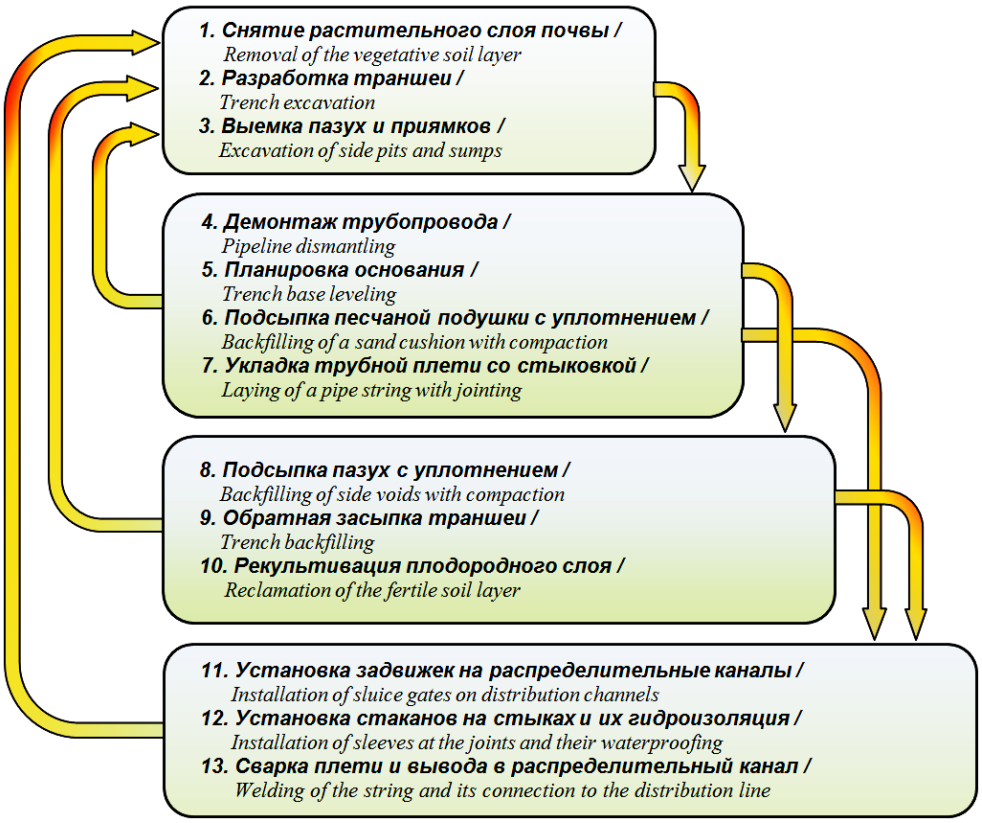


Рис. 2. **Функциональная модель сгруппированного технологического процесса реконструкции закрытой оросительной сети /**

Fig. 2. **Functional model of the grouped technological process for reconstructing a closed irrigation network**

1.4. *Подготовка данных.* Детальная инвентаризация и параметризация всех объектов системы выполняется на этапе подготовки данных. Для технологических машин здесь определяются ключевые атрибуты (мощность, скорость, вместимость ковша), потому что без этих параметров невозможно описать поведение техники. Для операций задаются их алгоритм, длительность, условия начала и завершения. Особое внимание уделяется сбору статистических сведений о внешних факторах и случайных событиях, где к таким событиям относятся время устранения отказа и продолжительность организационных задержек. Именно эти данные в дальнейшем формируют стохастическую составляющую модели.

2.1. *Выявление действующих факторов.* На этапе выявления действующих факторов проводится дополнительная формализация и уточнение факторов, влияющих на единичные элементы моделируемой технологической системы. К ним относятся параметры надёжности машин и оборудования, возрастной состав техники, квалификация операторов, уровень производственно-технической эксплуатации предприятия-подрядчика, а также природно-климатические условия.

2.2-2.3. *Описание онтологии единичных и групповых элементов*. При описании онтологии единичных и групповых элементов ключевым аспектом становится программирование не только отдельных действий, но и механизмов обратной связи, обеспечивающих адаптивность системы. Пример: агент «подсистема управления», получая данные от агентов «процесс» и «ресурсы», способен динамически перераспределять задания или менять приоритеты. Внешняя среда моделируется как активный агент либо как набор событий, генерирующих стохастические возмущения (изменение погоды, отказы, технологические простои), на которые система должна реагировать. Такой подход позволяет изучать устойчивость и эффективность системы в изменчивых условиях. Использование методологии IDEF0 для описания динамической системы имеет существенное ограничение: она не в полной мере отображает процессы и взаимосвязи, эволюционирующие во времени. Именно поэтому переход к агентной модели оказался уместным и логичным дополняющим решением. Каждый этап на схеме

был преобразован в состояние или действие соответствующего агента, а связи между этапами – в события либо сообщения, инициирующие переходы между состояниями. Предложенная схема напрямую определяет логику диспетчеризации в модели: она диктует, при каких условиях одна операция завершается и начинается следующая, как распределяются машины по захваткам.

Таким образом, схема является визуальным представлением логического ядра имитационного алгоритма, представленного ранее на рисунке 2 (цифровые обозначения технологических операций соответствуют).

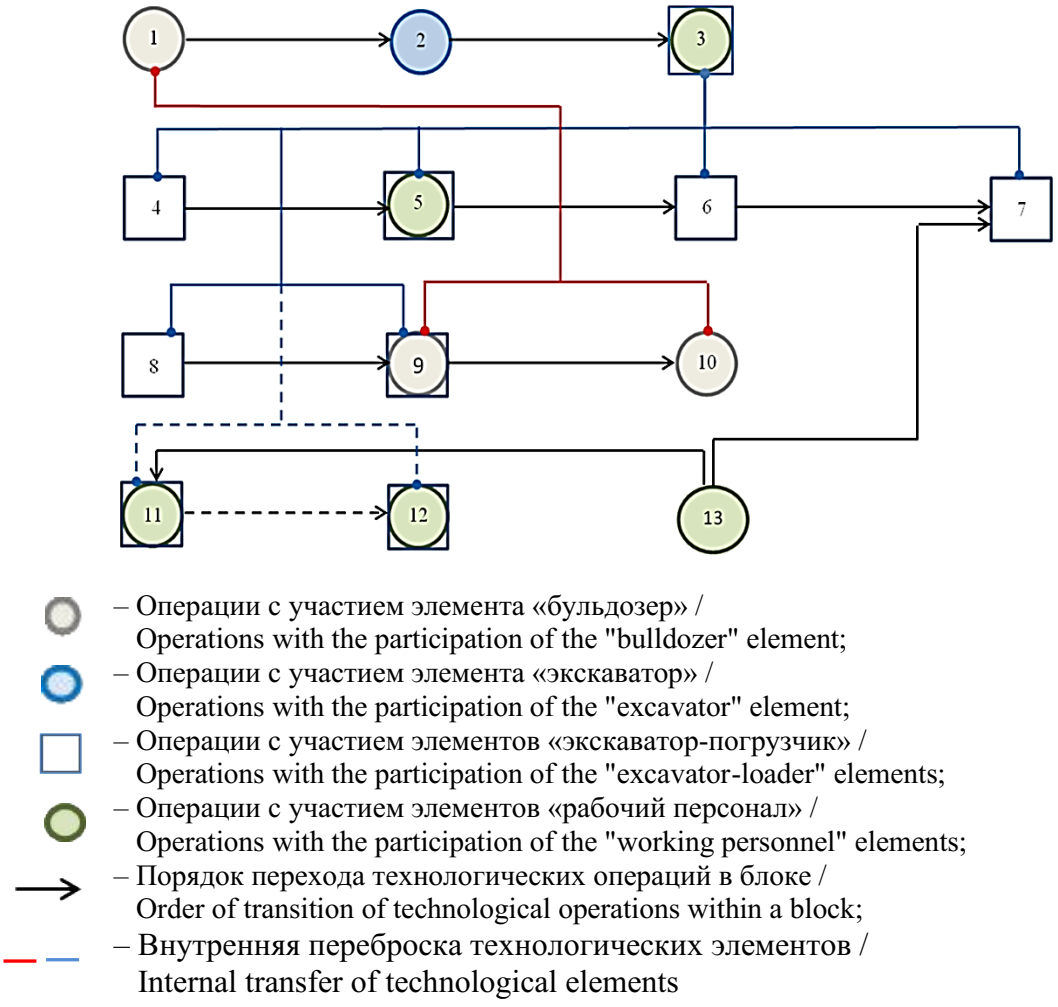


Рис. 3. **Схема перемещения технологических машин в процессе выполнения технологического процесса /**

Fig. 3. **Diagram of technological machinery movement during the execution of the technological process**

Применение данной схемы в ходе имитационного моделирования обеспечивает четкую визуализацию логической последовательности технологического процесса, а также позволяет с высокой точностью смоделировать сеть взаимосвязей и временну́ю логику функционирования системы.

Преобразование накопленных эмпирических данных и инженерных знаний в формализованную среду AnyLogic выполняется путем задействования соответствующих готовых компонентов из встроенных библиотек среды имитационного моделирования.

В результате формируется многоуровневая имитационная структура, где нижний уровень представлен взаимодействующими агентами-исполнителями, а верхний – управляющими правилами и сценариями [12]. Такая архитектура отражает организационную структуру реального проекта и одновременно позволяет гибко тестировать различные стратегии управления (достаточно изменить правила в подсистеме управления без перепрограммирования логики отдельных агентов). Тем самым создаётся мощный инструмент для анализа

сценариев «что-если» ещё до этапа практической реализации. Совокупность алгоритмов элементов системы, интегрированная с алгоритмом управляющей подсистемы, формирует интеллектуальный компонент мультиагентной системы. Наличие такого компонента в модели даёт возможность воссоздавать и детально настраивать различные производственные сценарии. Таким образом, представленная методология последовательно решает задачу перехода от концептуального описания сложной стохастической системы (включая внутреннюю переброску технологических элементов) к её работоспособному, адекватному и гибкому имитационному аналогу [16].

Решающим фактором успеха является итеративный процесс, сочетающий формализацию структурных и функциональных связей, агентную декомпозицию и строгую параметрическую настройку на основе объективных данных. Полученная модель является не итогом, а началом аналитического этапа, открывая возможности для глубокого исследования, оптимизации и повышения надежности проектов в области природообустройства. Данный подход позволяет рассматривать разработанную модель в качестве прототипа цифрового двойника технологической системы.

3.1. *Тестирование алгоритма модели.* После серии тестовых прогонов выполняется анализ полученных данных и графиков с целью подтверждения внутренней согласованности модели. Убедительным доказательством корректности является стабильность системы при длительных запусках, логичная реакция на граничные значения технологических параметров.

Итеративный характер тестирования позволяет не только выявлять программные ошибки, но и калибровать модель. На начальных этапах, при изолированном тестировании отдельных агентов и простых связей, валидируется корректность базовой логики и распределения атрибутов. Например, проверяется, корректно ли агент «экскаватор» изменяет свое состояние при получении задания, и соответствует ли расход ресурсов заданным математическим зависимостям.

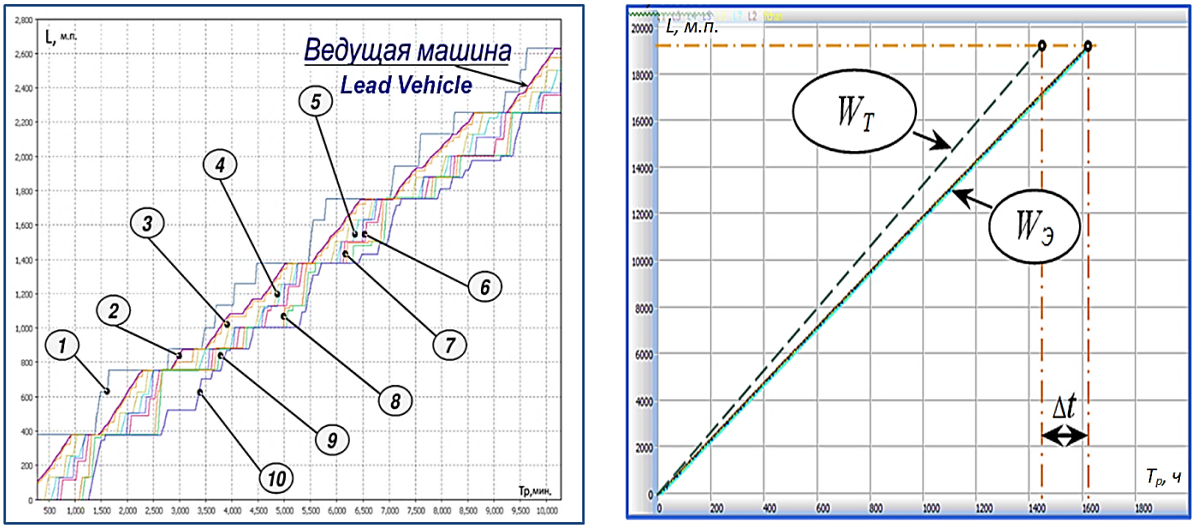
По мере усложнения тестов до уровня взаимодействия подсистем, ключевым объектом анализа становится соответствие динамики выходных показателей модели ожидаемому системному поведению. Наблюдение за графиком выполнения работ (рис. 4) в реальном времени служит мощным диагностическим инструментом.

Нелинейность графика, его «ступенчатый» характер и вариативность при повторных запусках перестают быть артефактом, а становятся ожидаемым проявлением стохастической природы системы, подтверждая адекватность заложенных вероятностных распределений (времени операций, простоев) и логики принятия решений агентами в условиях неопределенности. Следовательно, при каждом новом прогоне модели, учитывающей стохастическую природу этих факторов, будут достигаться различные результаты, что позволит по итогам множественного компьютерного эксперимента определить математическое ожидание искомых параметров моделируемого процесса (производительность системы, продолжительность работ, суммарные и приведенные затраты).

При этом математическое ожидание значения эксплуатационной производительности технологической системы $W_э$ будет значительно отличаться от технической производительности технологической системы W_m, определяемой аналитическими расчетами по параметрам работы ведущей машины, что обусловлено учетом в процессе имитационного моделирования влияния внешних и внутренних факторов, взаимного влияния участников технологического процесса (см. рис. 4, *б*).

Эта вариативность, будучи артефактом сознательного включения в модель случайных величин и системных ограничений, подтверждает ее способность генерировать правдоподобные, а не детерминированные сценарии.

После проведения серии валидационных прогонов, в ходе которых была подтверждена высокая степень соответствия функциональных зависимостей модели реальным процессам, обоснованно принимается решение о переходе к следующей фазе – проведению имитационного эксперимента. Данный эксперимент нацелен на исследование системы в условиях, максимально приближенных к параметрам реального технологического процесса [17]. Тем самым он знаменует собой переход к заключительному этапу разработки агентной имитационной модели.



а / a ***б / b***

① – **Операция 1**: Снятие растительного слоя почвы / **Operation 1:** Removal of the vegetative soil layer
② – **Операция 2**: Разработка траншеи / **Operation 2:** Trench excavation
③ – **Операция 3**: Выемка пазух и приямков / **Operation 3:** Excavation of side pits and sumps
④ – **Операция 4**: Демонтаж трубопровода / **Operation 4:** Pipeline dismantling
⑤ – **Операция 5**: Планировка основания траншеи / **Operation 5:** Trench base leveling
⑥ – **Операция 6**: Подсыпка песчаной подушки с уплотнением / **Operation 6:** Backfilling of a sand cushion with compaction
⑦ – **Операция 7**: Укладка трубной плети со стыковкой / **Operation 7:** Laying of a pipe string with jointing
⑧ – **Операция 8**: Подсыпка пазух с уплотнением / **Operation 8:** Backfilling of side voids with compaction
⑨ – **Операция 9**: Обратная засыпка траншеи / **Operation 9:** Trench backfilling
⑩ – **Операция 10**: Рекультивация плодородного слоя / **Operation 10:** Reclamation of the fertile soil layer

Рис. 4. **Диаграмма реализации имитационной модели функционирования технологической системы реконструкции закрытой оросительной сети: *а* – на отдельном участке объекта; *б* – на всей протяженности объекта /**

Fig. 4. **Fragment of the simulation model execution graph for the technological system of closed irrigation network reconstruction: *a* – on a separate section of the facility; *b* – along the entire length of the facility**

3.2. *Настройка имитационной модели.* Заключительный этап – финальная калибровка и валидация модели. В отличие от верификации, которая подтверждает, что модель технически работает «как задумано», валидация отвечает на вопрос, насколько точно модель отражает реальную систему. Этот процесс включает в себя два взаимосвязанных направления:

- *параметрическая калибровка*: точная настройка внутренних параметров модели (например, коэффициентов производительности, законов распределения времени операций, вероятностей событий) для минимизации расхождений между выходными показателями модели и историческими или эталонными данными;

- *валидация адекватности*: оценка способности модели не только воспроизводить известные данные, но и давать правдоподобные прогнозы в новых, неиспытанных условиях. Для этого применяются такие методы, как сравнение поведения модели с экспертной оценкой, анализ чувствительности ключевых выходных параметров к изменению входных и проверка на экстремальных (стрессовых) сценариях.

3.3. *Оценка адекватности*. Здесь результаты модели сравнивают с натурными исследованиями, чтобы понять, можно ли модель применять или её надо корректировать.

Сравнение проводят, анализируя расхождения между выходными данными модели и статистикой реальной технологической системы. Главный анализируемый показатель – дисперсия этих расхождений.

Модель принимается, если фактические статистические параметры системы укладываются в доверительный интервал, найденный по формуле.

Модель принято считать адекватной при выполнении выражения:

$$y_f \in [y_{mod} - t_\alpha \cdot \sigma_{mod};\ y_{mod} + t_\alpha \cdot \sigma_{mod}],$$

при $x_{mod} = x_f$,

где y_f, y_{mod} – результат реальной системы и моделируемой соответственно; x_f, x_{mod} – входные данные реальной системы и моделируемой соответственно; t_α – критерий Стьюдента; σ_{mod} – среднеквадратичное отклонение моделируемых показателей.

Завершающим шагом настройки является дополнительная аналитическая обработка статистических данных для всех стохастических величин, используемых в модели. В ходе этого процесса производится уточнение законов их распределения с последующим внедрением уточнённых параметров в модель и в электронный паспорт соответствующего агента. При этом важно отметить следующее: чрезмерная детализация способна снизить практическую вычислительную эффективность модели. Введение более сложных законов распределения для величин с незначительным влиянием на процесс относится к такой детализации, потому что вычислительные затраты не окупаются приростом точности. В ситуациях избыточности модели исследователь вправе принять решение об упрощении её структуры. Агрегирование малозначимых параметров в группы или сокращение диапазона варьирования стохастических величин до фиксированного (среднего) значения достигается на этом пути, где упрощение становится осознанной стратегией. В силу стохастической природы результатов моделирование данного технологического процесса не допускает однократной настройки.

Для решения задач, связанных со случайными величинами, эффективно применяется метод Монте-Карло [18], использование которого обладает рядом специфических особенностей [19].

Представленный график диаграммы хода реконструкции позволяет выявить важную особенность модели: процесс на каждой захватке протекает уникально, без чёткого шаблонного повторения. Это свидетельствует о том, что перед нами динамическая и стохастическая система. Её поведение не задано жёстко, а формируется в реальном времени как реакция на непрерывно меняющуюся совокупность параметров среды и состояния самой системы – и именно это учитывается в модели. Проведённый системный анализ позволил установить существенную зависимость технологического процесса от воздействия стохастических факторов. Данное ключевое свойство было заложено в основу имитационной модели, что обуславливает принципиальную невозможность гарантировать полное воспроизведение результатов при повторном запуске. Для получения статистически надёжных выводов необходимо проводить серии имитационных экспериментов с последующей агрегацией и анализом полученных данных.

Учёт случайных величин и событий в модели был реализован целенаправленно, что исключает детерминированность выходных данных. Следовательно, результат единичного вычислительного эксперимента следует рассматривать как одну из возможных реализаций процесса, а не как однозначный прогноз.

Наиболее эффективным методом для исследований в подобных условиях является метод статистических испытаний (Монте-Карло), который получил широкое распространение в имитационном моделировании сложных систем, подверженных влиянию случайности.

Ключевой особенностью применения метода Монте-Карло является определение оптимального числа итераций (повторов опыта), необходимого для достижения статистически значимых результатов. Несмотря на значительный рост вычислительных мощностей, сделавший метод массово доступным, проблема обоснования требуемого количества прогонов для конкретного эксперимента не имеет универсального аналитического решения. Этот параметр зависит от дисперсии моделируемых величин и требуемой точности, что обуславливает необходимость использования эмпирических подходов к его определению в каждом конкретном случае.

На рисунке 5 представлен результат множественного компьютерного эксперимента на агентной имитационной модели технологической системы (в системе Сроки/Затраты). Модель последовательно перебирала 135 вариантов комплектования технологического комплекса машин с различной производительностью и надежностью техники и производила моделирование каждого варианта с необходимым для достаточной точности моделирования числом итераций (не менее 1000 прогонов).

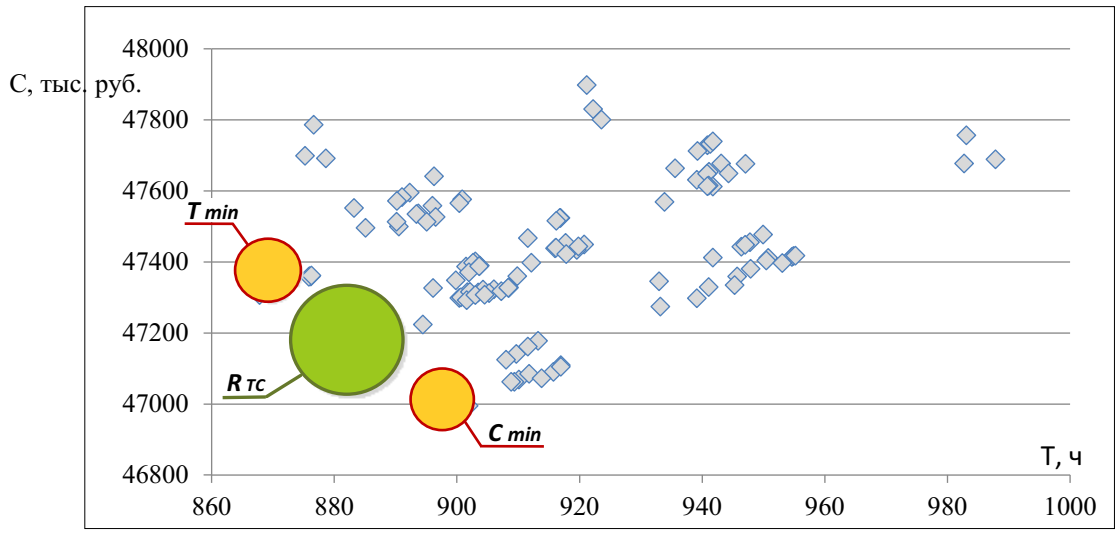


Рис. 5. **Пример результатов агентного имитационного моделирования функционирования технологической системы в природообустройстве /**

Fig. 5. **An example of the results of agent-based simulation modeling of the functioning of a technological system in environmental management**

Кластер откликов модели T_{min} обозначает область наилучших вариантов структуры технологической системы по критерию минимума общей продолжительности ведения работ (сроки). Кластер C_{min} обозначает область наилучших вариантов структуры технологической системы по критерию минимума общих эксплуатационных затрат на реализацию проекта. Кластер откликов модели R_{TC} обозначает область рациональных вариантов структур технологической системы, одновременно учитывая приемлемые значения эксплуатационных затрат и сроков выполнения работ [20].

В случае производственной необходимости ЛПР имеет возможность корректировать эксплуатационные показатели технологической системы с помощью изменения состава технологического комплекса машин или коррекции параметров технологического процесса, что позволяет организовать более гибкие и адаптивные методы управления производственной деятельностью природообустроительной организации [21, 22].

Заключение. В процессе разработки научно-методического подхода к проектированию и оптимизации эффективных технологических систем в природообустройстве (на примере реконструкции закрытой оросительной сети) получены следующие результаты:

- предложен комплексный методологический подход, позволяющий последовательно интегрировать этапы онтологического описания предметной области, формализации функционально-технологических связей и агентного моделирования для задач проектирования технологических систем в природообустройстве;

- разработана оригинальная онтология блочных элементов технологических систем в области природообустройства, которая формализует не только статическую структуру (оборудование, ресурсы), но и динамические сценарии их взаимодействия с учетом вероятностного воздействия эксплуатационной среды, а также организационно-технологические ограничения;

- создана и апробирована адаптивная агентная модель, в которой активными элементами (агентами) выступают не только технические единицы (машины, оборудование, бригады), но и ключевые технологические процессы, воздействия системы производственно-технической эксплуатации и управляющие решения. Это позволило учесть ранее игнорируемые факторы, такие как вариабельность квалификации персонала, уровень технической эксплуатации, совершенство и техническое состояние средств механизации, характер отказов машин и оборудования, изменение погодных условий, непосредственно влияющее на логистику и графики работ;

- продемонстрирована эффективность предлагаемого подхода на реальном кейсе реконструкции напорного трубопровода закрытой оросительной системы, где инструментарий позволил не только симулировать различные сценарии функционирования технологической системы при рассмотрении различных структур и форм организации производства работ, но и выявить критические зависимости между

уровнем организационно-технологического обеспечения работ, составом технологического комплекса машин и совокупной производительностью всей технологической системы, предложив Парето-оптимальные (рациональные) решения.

Разработанный научно-методический подход призван обеспечить формирование рациональных, адаптивных и ресурсоэффективных структур технологических систем в условиях ограниченной статистической информации и высокой изменчивости эксплуатационной среды.

Комбинирование имитационного моделирования и агентных методов представляет собой достаточно мощный инструмент для разработки и эксплуатации эффективных технологических систем в области природообустройства. Такой подход способен обеспечить повышение надежности и эффективности технологической системы, а также способствует адаптации к меняющимся условиям эксплуатации, что особенно актуально при ограниченных ресурсах и изношенном оборудовании.

Список литературы

1. Муравьева М. В., Глебов И. П. Экономические проблемы ресурсного обеспечения орошаемого земледелия России. Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2023;(12):39–48. DOI: https://doi.org/10.33938/2312-39 EDN: LKVMLN

2. Акупиян О. С., Заворотин Е. Ф., Здоровец Ю. И. Анализ государственного финансирования развития мелиоративного комплекса России: региональный аспект. Экономика, труд, управление в сельском хозяйстве. 2023;(10(104)):69–77. DOI: https://doi.org/10.33938/2310-69 EDN: HIUKWA

3. Кодирова А. С. Цифровая трансформация сельского хозяйства: направления «зелёной революции» и управления отраслью. АПК: экономика, управление. 2024;(6):119–124. DOI: https://doi.org/10.33305/246-119 EDN: BDUCFP

4. Горностаев В. И., Новиченко А. И., Подхватилин И. М. Системный подход в исследовании технологических процессов в сфере механизации сельского хозяйства. Материалы международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящ. 150-летию А. В. Леонтовича. Москва, 03–06 июня 2019 года. М.: РГАУ–МСХА им. К. А. Тимирязева, 2019. С. 494–496.

5. Подхватилин И. М., Новиченко А. И., Горностаев В. И. Мультиагентное имитационное моделирование технологических систем в природообустройстве с учетом условий их эксплуатации. Доклады ТСХА: Международ. научн. конф., посвящ. 125-летию со дня рождения В. С. Немчинова, Москва, 03–05 декабря 2019 года. М.: РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2020. Вып. 292, Ч. I. С. 551–555.

6. Лобачевский Я. П., Миронов Д. А., Кислицкий М. М., Миронова А. В. Эффекты от применения цифровых двойников в сельском хозяйстве. Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2023;(103):71–78. DOI: https://doi.org/10.21515/1999-1703-103-71-78 EDN: TLGOWG

7. Ламм А. К., Расулов Р. К. Обобщённая концепция технико-экономического обоснования разработки цифровых двойников в сельском хозяйстве. Экономика сельского хозяйства России. 2023;(11):74–79. DOI: https://doi.org/10.32651/2311-74 EDN: ERLUCK

8. Шиловский В.Н., Скобцов И.Г., Конанов Д.Г. Оценка факторов эксплуатационной технологичности машин методом регрессионного анализа. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022;(240):163–174. DOI: https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.240.163-174 EDN: NTALGN

9. Дидманидзе О. Н., Карелина М. Ю., Сидоров Б. Б. Методика управления возрастной структурой машинотракторного парка на базе дискретных форм представления показателей ТО и ТР. Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2024;16(1):95–100. DOI: https://doi.org/10.36508/RSATU.2024.82.94.013 EDN: GGSJJJ

10. Речинский А. В., Семенов К. К., Сушников В. А., Черненькая Л. В., Черненький А. В. Инструментальные средства систем имитационного моделирования. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024;(4):122–129. DOI: https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-4-122-123 EDN: BIKWZS

11. Евграфов В. А., Новиченко А. И., Горностаев В. И., Подхватилин И. М., Анисимов А. В. Применение мультиагентного подхода при формировании оптимального состава парка машин в среде имитационного моделирования AnyLogic. Научное обозрение. 2015;(24):123–127. Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=25602057 EDN: VOGMQZ

12. Акбердина В. В., Шориков А. Ф. Иерархическая агентно-ориентированная модель управления промышленным комплексом. Управленец. 2022;13(6):2–14. DOI: https://doi.org/10.29141/2218-5003-2022-13-6-1 EDN: WNQLUI

13. Принев М. А., Леденева Т. М., Гаршина В. В. Многоагентные системы: обзор современных подходов к моделированию и проектированию. (Часть 2). Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2024;(4):167–190. DOI: https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2024/4/167-190 EDN: KJBPCG

14. Большаков В. Э., Сакулин С. А., Алфимцев А. Н. Мультиагентное обучение с подкреплением с использованием коллективной внутренней мотивации. Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2023;(4(145)):61–85. DOI: https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-4-61-84 EDN: WCRTDW

15. Листопад С. В., Кириков И. А. Анализ подходов к идентификации структуры проблемы в гибридных интеллектуальных многоагентных системах. Системы и средства информатики. 2024;34(3):35–47. DOI: https://doi.org/10.14357/08696527240304 EDN: RSLMXC

16. Словохотов Ю. Л., Новиков Д. А. Распределенный интеллект мультиагентных систем. Ч. 1. Основные характеристики и простейшие формы. Проблемы управления. 2023;(5):3–22. DOI: https://doi.org/10.25728/pu.2023.5.1 EDN: CFQKJZ

17. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Россошанская Е. А., Дорошенко Т. А., Самсонова Н. А. Проблемы стандартизации описания агент-ориентированных моделей и возможные пути их решения. Вестник Российской академии наук. 2023;93(4):362–372. DOI: https://doi.org/10.31857/S0869587323040059 EDN: SCIOKT

18. Бекетов С. М., Гинцяк А. М., Дергачев М. В. Алгоритм оценки сходимости стохастической Парето-оптимизации. Информационные технологии и вычислительные системы. 2024;(4):91–99. DOI: https://doi.org/10.14357/20718632240409 EDN: HBLXQQ

19. Демиденко О. М., Борчик Е. М., Якимов А. И. Многокритериальная оптимизация распределения ресурсов в процессе производства готовой продукции. Проблемы физики, математики и техники. 2022;(3(52)):90–96. DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_90 EDN: HPJWKR

20. Курганов В. М., Грязнов М. В., Колобанов С. В. Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере. Записки Горного института. 2020;241:10–21. DOI: https://doi.org/10.31897/PMI.2020.1.10 EDN: EUEOIJ

21. Dorri A., Kanhere S. S., Jurdak R. Multi-Agent Systems: A survey. IEEE Access. 2018;6:28573–28593. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2831228

22. Tsyplakov A. A., Melnikova L. V., Ibragimov N. I. Agent-Based Modeling of Spatial Economic Systems: a Review. Journal of Siberian Federal University. Humanities & Social Sciences 2021;14(12):1910–1919. DOI: https://doi.org/10.17516/1997-1370-0869 EDN: HWZUDG

References

1. Muravyova M. V., Glebov I. P. Economic problems of resource supply for irrigated agriculture in Russia. *Ekonomika, trud, upravleniye v selskom khozyaystve*. 2023;(12):39–48. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.33938/2312-39

2. Akupiyan O. S., Zavorotin E. F., Zdorovets Yu. I. Analysis of state financing of Russian land reclamation complex development: regional aspect. *Ekonomika, trud, upravleniye v selskom khozyaystve*. 2023;(10(104)):69–77. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.33938/2310-69

3. Kodirova A. S. Digital transformation of agriculture: directions of the "green revolution" and industry management. *APK: ekonomika, upravleniye*. 2024;(6):119–124. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.33305/246-119

4. Gornostayev V. I., Novichenko A. I., Podkhvatilin I. M. A systematic approach to the study of technological processes in the field of agricultural mechanization. Proceedings of the International scientific conference of young scienti sts and specialists, dedicated to 150th anniversary of A. V. Leontovich. Moscow, June 03-06, 2019. Moscow: *RGAU–MSKHA im. K. A. Timiryazeva*, 2019. pp. 494–496.

5. Podkhvatilin I. M., Novichenko A. I., Gornostayev V. I. Multi-agent simulation of technological systems in environmental management, taking into account their operating conditions. TLCA reports: International scientific conference, dedicated to 125th anniversary of V. S. Nemchinov, Moscow, December 03-05, 2019. Moscow: *RGAU – MSKHA im. K. A. Timiryazeva*, 2020. Iss. 292, Ch. I. pp. 551–555.

6. Lobachevsky Ya. P., Mironov D. A., Kislitsky M. M., Mironova A. V. Digital twins use effects in agriculture. *Trudi Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2023;(103):71–78. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21515/1999-1703-103-71-78

7. Lamm A. K., Rasulov R. K. Generalized concept of feasibility study for the development of digital twins in agriculture. *Ekonomika selskogo khozyaystva Rossii* = Economics of Agriculture of Russia. 2023;(11):74–79. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.32651/2311-74

8. Shilovsky V. N., Skobtsov I. G., Konanov D. G. Estimation of forest machine operational efficiency factors by regression analysis. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii*. 2022;(240):163–174. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.240.163-174

9. Didmanidze O. N., Karelina M. Yu., Sidorov B. B. Method of managing the age structure of the machine and tractor fleet based on discrete forms of representation of maintenance and tractor indicators. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P. A. Kosticheva* = Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev. 2024;16(1):95–100. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.36508/RSATU.2024.82.94.013

10. Rechinskiy A. V., Semenov K. K., Sushnikov V. A., Chernenkaya L. V., Chernenkii A. V. Tools of simulation modeling systems. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. 2024;(4):122–129. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.24412/2071-6168-2024-4-122-123

11. Evgrafov V. A., Novichenko A. I., Gornostaev V. I., Podkhvatilin I. M., Anisimov A. V. Usage of multiagent approach in forming the optimal composition of machine fleet in AnyLogic imitation modeling environment. *Nauchnoye obozreniye*. 2015;(24):123–127. (In Russ.). URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=25602057

12. Akberdina V. V., Shorikov A. F. Managing industrial complexes: a hierarchical agent-oriented model. *Upravlenets* = The Manager. 2022;13(6):2–14. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.29141/2218-5003-2022-13-6-1

13. Prinev M. A., Ledeneva T. M., Garshina V. V. Multi-agent systems: a review of modern approaches to modeling and projecting (Part 2). *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemny analiz i informatsionniye tekhnologii*. 2024;(4):167–190. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.17308/sait/1995-5499/2024/4/167-190

14. Bolshakov V. E., Sakulin S. A., Alfimtsev A. N. Multi-agent reinforcement learning using the collective intrinsic motivation. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Seriya Priborostroyeniye* = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering. 2023;(4(145)):61–85. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-4-61-84

15. Listopad S. V., Kirikov I. A. Analysis of approaches to problem structure identification in hybrid intelligent multiagent systems. *Sistemi i sredstva informatiki* = Systems and Means of Informatics. 2024;34(3):35–47. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.14357/08696527240304

16. Slovokhotov Yu. L., Novikov D. A. Distributed intelligence of multi-agent systems. Part 1: basic features and simple forms. *Problemi upravleniya*. 2023;(5):3–22. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.25728/pu.2023.5.1

17. Makarov V. L., Bakhtizin A. R., Rossoshanskaya E. A., Doroshenko T. A., Samsonova N. A. Problems of standardizing agent-based model description and possible ways to solve them. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* = Herald of the Russian Academy of Sciences. 2023;93(4):362–372. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.31857/S0869587323040059

18. Beketov S. M., Gintsyak A. M., Dergachev M. V. Algorithm for estimating the convergence of stochastic pareto optimization. *Informatsionniye tekhnologii i vichislitelniye sistemi* = Information Technologies and Computing Systems. 2024;(4):91–99. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.14357/20718632240409

19. Demidenko O. M., Borchik E. M., Yakimov A. I. Multi-criterial optimization of resource distribution in the process of finished products. *Problemi fiziki, matematiki i tekhniki* = Problems of Physics, Mathematics and Technics. 2022;(3(52)):90–96. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2022_3_52_90

20. Kurganov V. M., Gryaznov M. V., Kolobanov S. V. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes. *Zapiski Gornogo instituta* = Journal of Mining Institute. 2020;241:10–21. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.31897/PMI.2020.1.10

21. Dorri A., Kanhere S. S., Jurdak R. Multi-Agent Systems: A survey. IEEE Access. 2018;6:28573–28593. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2831228

22. Tsyplakov A. A., Melnikova L. V., Ibragimov N. I. Agent-Based Modeling of Spatial Economic Systems: a Review. Journal of Siberian Federal University. Humanities & Social Sciences 2021;14(12):1910–1919. DOI: https://doi.org/10.17516/1997-1370-0869 EDN: HWZUDG

Вклад авторов: все авторы статьи внесли значимый вклад в проведение научных исследований и подготовку материалов к публикации, который выражается в разработке общей концепции и формировании плана исследования (Дидманидзе О. Н., Парлюк Е. П., Новиченко А. И), проведении анализа данных (Парлюк Е. П., Новиченко А. И.), подготовке структуры и смысловом наполнении рукописи (Дидманидзе О. Н., Новиченко А. И.).

Сведения об авторах

Дидманидзе Отари Назирович, доктор техн. наук, профессор, академик РАН, заведующий кафедрой тракторов и автомобилей, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», ул. Тимирязевская, д. 49, г. Москва, Российская Федерация, 127434, e-mail: info@rgau-msha.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2558-0585

Парлюк Екатерина Петровна, доктор техн. наук, профессор кафедры колесных машин, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», ул. Бауманская 2-я, д. 5, стр. 1, г. Москва, Российская Федерация, 105005, e-mail: bauman@bmstu.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0691-3487

✉ **Новиченко Антон Игоревич,** кандидат техн. наук, доцент кафедры технического сервиса машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», ул. Тимирязевская, д. 49, г. Москва, Российская Федерация, 127434, e-mail: info@rgau-msha.ru,
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4834-7700, e-mail: novichenko@rgau-msha.ru

Author contributions: All authors made a significant contribution to the scientific research and preparation of materials for publication, which is expressed in the development of the general concept and the formation of the research plan (Didmanidze O. N., Parlyuk E. P., Novichenko A. I.), conducting data analysis (Parlyuk E. P., Novichenko A. I.), preparing the structure and semantic content of the manuscript (Didmanidze O. N., Novichenko A. I.).

Information about the authors

Otari N. Didmanidze, DSc in Engineering, professor, academician of RAS, Head of the Department of Tractors and Automobiles, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, Russian Federation, 127434, e-mail: info@rgau-msha.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2558-0585**

Ekaterina P. Parlyuk, DSc in Engineering, professor at the Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University, Baumanskaya st. 2-ya, 5, b. 1, Moscow, Russian Federation, 105005, e-mail: bauman@bmstu.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0691-3487**

✉ **Anton I. Novichenko,** PhD in Engineering, associate professor, the Department of Technical Service of Machinery and Equipment, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, Russian Federation, 127434, e-mail: info@rgau-msha.ru, **ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4834-7700,** e-mail: novichenko@rgau-msha.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

Политика журнала «Аграрная наука Евро-Северо-Востока» в отношении использования генеративного искусственного интеллекта (генИИ)

Авторам статей

1. При проведении научных исследований и создании научных публикаций необходимо придерживаться вариантов использования генИИ, регламентируемых ГОСТ Р 71657-2024 https://files.stroyinf.ru/Data/836/83601.pdf и ГОСТ Р 70949-2023 https://meganorm.ru/Data/814/81496.pdf

2. Данная политика будет обновляться в связи с развитием технологий генИИ, разработкой новых рекомендаций по использованию генИИ при подготовке научных статей.

3. Редакция выявляет сгенерированный текст с помощью систем «Антиплагиат» и «Думейт» и при этом не использует «пороговый» подход (допустимый процент сгенерированного текста в статье).

4. Авторы должны соблюдать этические нормы и требования к оригинальности текста при использовании генИИ. Результаты, полученные с применением генИИ, должны тщательно проверяться и редактироваться авторами, так как ИИ-модели могут «галлюцинировать» (создавать ложную или некорректную информацию). ГенИИ не может быть указан автором или соавтором статьи. Ответственность за окончательный текст несет человек – автор статьи.

5. **Авторы обязаны указывать информацию об использовании генИИ** в процессе создания рукописи. В разделе «Материалы и методы» оригинальных и обзорных статей указываются цели использования генИИ, в постраничной сноске – наименование инструмента генИИ, версия и разработчик, дата обращения. Факт применения генИИ для корректировки изображений необходимо описать в подрисуночной подписи, Редакция может потребовать предоставление двух версий изображения (оригинальной и измененной с помощью генИИ). В других типах статей использование генИИ указывается в разделе «Раскрытие использования ИИ» (Пример: при подготовке этой работы автор(ы) использовали [НАЗВАНИЕ ИНСТРУМЕНТА/УСЛУГИ] для [ПРИЧИНА]. После использования этого инструмента/услуги автор(ы) просматривали и редактировали контент по мере необходимости и берут на себя полную ответственность за содержание публикации). Если генИИ не использовался при проведении исследования и подготовке статьи, укажите это.

6. Авторам рекомендуется сохранять информацию о взаимодействии с ИИ-инструментами, включая запросы (промпты) и полученные ответы для предоставления в Редакцию (при необходимости).

7. **Редакция журнала не допускает использование программ с генИИ** для неконтролируемого решения ИИ ключевых задач автора: создание любого типа контента, включая метаданные и дополнительные материалы, интерпретация данных, формирование научных выводов, разработка рекомендаций, редактирование изображений с изменением исходных данных. Сокрытие авторами факта использования генИИ является нарушением публикационной этики.

Редакция при обнаружении не раскрытого автором использования генИИ (до или после публикации):

- запрашивает разъяснения от авторов по взаимодействию с ИИ-инструментами при подготовке статьи, а также (при необходимости) материалы, подтверждающие самостоятельную работу с текстом статьи (например, не обработанные генИИ данные и иллюстрации);
- выносит решение о судьбе публикации: внесение дополнений в статью об использовании генИИ; отзыв статьи по существующему алгоритму, запрет на подачу новых рукописей, уведомление организации автора.

При возникновении спорных ситуаций Редакция журнала опирается на существующие рекомендации и политику журнала в отношении использования генИИ.

Рецензентам статей

Использование генИИ при научном рецензировании недопустимо, так как этот процесс требует критического мышления и независимой оценки. Ответственность за содержание рецензии полностью лежит на рецензенте.

Рецензентам не следует**:**

- использовать программу с генИИ для оценки статьи;
- загружать текст статьи/рецензии (или их фрагменты) в программу с генИИ из-за возможного нарушения конфиденциальности.

В случае если рецензент подозревает, что в статье был использован генИИ, ему следует сообщить об этом редактору.

Редактору статей

Редакторы должны обеспечивать конфиденциальность неопубликованных рукописей и сопроводительных материалов.

Редактору не следует:

- загружать текст статьи/рецензии (или их фрагменты) в программу с генИИ из-за возможного нарушения конфиденциальности;
- использовать программу с генИИ для объединения комментариев рецензентов и подготовки письма для автора с итоговым решением о публикации;
- использовать генИИ для поиска рецензентов без человеческого контроля и оценки конфликта интересов.

ISSN 2072-9081 (print) Аграрная наука Евро-Северо-Востока, Том 27, № 2, 2026.
ISSN 2500-1396 (online) Agricultural Science Euro-North-East, Vol. 27, no.2, 2026.