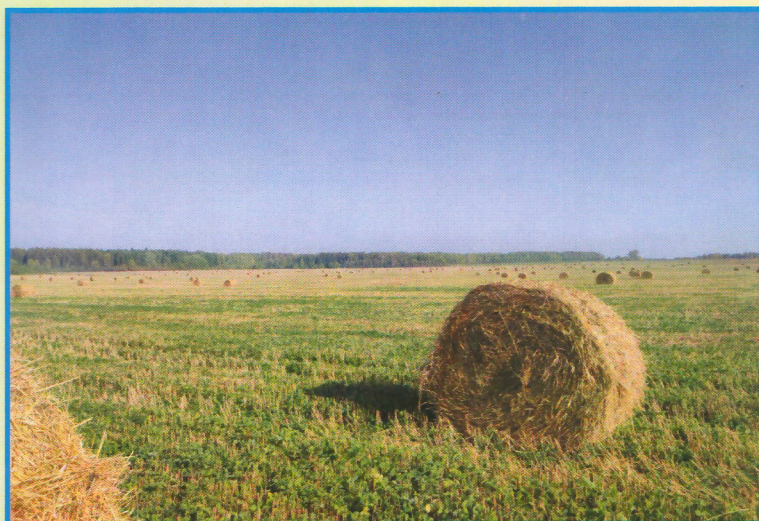


Аграрная наука Евро-Северо-Востока

AGRICULTURAL SCIENCE EURO-NORTH-EAST

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



Том 26
№ 4
2025

Vol. 26
No. 4
2025

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

(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



Главный редактор – Сысуюев 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 специалист по коммуникациям и инновациям, 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, заведующий кафедрой частной зоотехнии, разведения с.-х. 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

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 ФГБНУ «Санкт-Петербургский ФИЦ РАН», г. Санкт-Петербург, Россия

Куликов Иван Михайлович д.э.н., профессор, академик РАН, директор 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 ФГБНУ «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 ФГБНУ «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, ВИНТИ, AGRIS,
Russian Science Citation Index
(RSCI) на ведущей мировой
платформе Web of Science,
BASE, Dimensions,
Ulrich's Periodicals Directory,
DOAJ, EBSCO

Полные тексты статей
доступны на сайтах электронных
научных библиотек:
eLIBRARY.RU: <http://elibrary.ru/>;
ЭНЦХБ:

<http://www.cnsb.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

Третье фото
на первой странице обложки
В. Малишевского,
на второй странице обложки
фото З. Жубариной.

Подписано к печати
28.08.2025

Дата выхода в свет
03.09.2025

Формат 60x84^{1/8}.

Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 26,97.

Тираж 100 экз. Заказ 30.

Свободная цена

Отпечатано с оригинал-макета

Адрес типографии:

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

Савченко
Иван Васильевич

Самodelкин
Александр
Геннадьевич

Сисягин
Павел Николаевич

Титова
Вера Ивановна

Токарев
Антон Николаевич

Урбан
Эрома Петрович

Широких
Ирина Геннадьевна
Щенникова
Ирина Николаевна

Changzhong Ren

Ivanovs Semjons

Marczuk Andrzej

Náhlík András

Poutanen Kaisa

Romaniuk Wazlaw

Yu Li

Алешкин Алексей
Владимирович

Артёмьев Андрей
Александрович

Брандорф
Анна Зиновьевна

Бурков Александр
Иванович

Егошина Татьяна
Леонидовна

Ивановский
Александр
Александрович

Костенко Ольга
Владимировна

Рябова Ольга
Вениаминовна

Савельев
Александр
Павлович

Товстик Евгений
Владимировна

Филатов
Андрей Викторович

Шешегова
Татьяна Кузьмовна

Юнусов Губейдулла
Сибяттулович

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

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

д.в.н., профессор, чл.-корр. РАН, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный
агротехнологический университет», г. Нижний Новгород, Россия

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

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

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

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

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

Президент Байченской академии сельскохозяйственных наук (КНР),
иностранный член РАН, г. Байчен, Китай

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

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

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

профессор VTT технического исследовательского центра Финляндии,
г. Эспоо, Финляндия

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

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

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

© 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



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 Communications and Innovation Specialist, 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, Head of the Department of Small Animal Science, Breeding of Farm Animals and Obstetrics of Nizhny 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 |
| 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 Agroecology, 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, Director of the 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 Nizhny 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

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

The third photo is on the first page of the cover by V. Malishevsky, and the second page of the cover is a photo by Z. Zhubarinoy.

Passed for printing
28.08.2025

Date of publication
03.09.2025

Format 60x84^{1/8}. Offset paper.
Cond. pecs. l. 26.97.

Circulation 100 copies. Order 30.
Free price.

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

Ivan V. Savchenko

Alexander G. Samodelkin

Pavel N. Sisyagin

Vera I. Titova

Anton N. Tokarev

Eroma P. Urban

Irina G. Shirokikh

Irina N. Shchennikova

Changzhong Ren

Semjons Ivanovs

Andrzej Marczuk

András Náhlik

Kaisa Poutanen

Vaclav Romaniuk

Li Yu

Aleksey V. Aleshkin

Andrey A. Artemjev

Anna S. Brandorf

Alexander I. Burkov

Tatyana L. Egoshina

Alexander A. Ivanovsky

Olga V. Kostenko

Olga V. Ryabova

Alexander P. Saveljev

Evgeniya V. Tovstik

Andrey V. Filatov

Tatyana K. Sheshhegova

Gubeidulla S. Junusov

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

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

Dr. of Sci. (Veterinary), the professor, corresponding member of RAS, Nizhny Novgorod State Agrotechnological University, Nizhny Novgorod, Russia

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

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

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

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

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

President of the Baicheng Academy of Agricultural Sciences (China), a foreign member of RAS, Baicheng, China

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

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

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

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

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

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

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. Sheshhegova 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

И. С. Кожеевникова, А. О. Ступина, И. А. Классен

Роль генов соматотропной оси в регуляции продуктивных качеств молочного и мясного скота (обзор)..... 713

О. А. Бурова, Е. А. Широкова, Т. В. Овсянко, Т. Н. Демидова, И. В. Яшин, А. А. Блохин

Аспекты биологической безопасности производства кормов для свиней (обзор)..... 725

К. С. Инчагова, И. А. Вершинина

Перспективы использования кустарников Европейской части России в животноводстве (обзор)..... 737

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

РАСТЕНИЕВОДСТВО

Е. С. Парфенова, Е. А. Псарева

Анализ адаптивного и продуктивного потенциала сортов озимой ржи вятской селекции..... 749

Б. И. Сандухадзе, Л. А. Марченкова, Р. З. Мамедов, О. В. Павлова, В. В. Бугрова, М. С. Крахмалёва, Р. Ф. Чавдарь, Т. Г. Орлова, Е. В. Савинов

Реакция сортов озимой мягкой пшеницы на стрессовое воздействие биотических и абиотических факторов среды.... 760

О. С. Амунова

Новый сорт мягкой яровой пшеницы Темп..... 773

О. Д. Голяева, А. В. Алпатова

Изучение сортов смородины красной по признакам мелко- и малосемянности..... 781

А. О. Савина, А. В. Шмыгов, О. А. Киселева

Особенности цветения и плодоношения новых гибридов жимолости синей в условиях Свердловской области... 788

ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

С. Р. Фасулати, О. В. Иванова

Результаты изучения сортов картофеля на устойчивость к колорадскому жуку двумя полевыми методами..... 797

В. В. Смур

Динамика ухудшения фитосанитарных показателей клубней с приростом продуктивности картофеля в предуборочный период вегетации..... 807

ХРАНЕНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

Д. Ф. Зиатдинова, Р. Г. Сафин, Е. Н. Соловьёва

Моделирование процесса экстрагирования масла из продуктов переработки облепихи..... 816

М. А. Шадрин, Н. В. Бураковская, Е. А. Молибога, Н. В. Щукина, М. И. Приставка

Оптимизация процесса ферментации крафтового пива посредством моделирования в системе Table Curve..... 827

ЗЕМЛЕДЕЛИЕ, АГРОХИМИЯ, МЕЛИОРАЦИЯ

Д. А. Рогачев

Повышение эффективности управления водопользованием оросительных систем: методология и технология... 840

ЗООТЕХНИЯ

В. М. Кузнецов

Информационный контент полиморфизма STR-локусов в выборках быков-производителей трёх пород..... 852

Н. С. Колесник, О. Н. Сивкина, О. А. Воронина, А. А. Савина, С. Ю. Зайцев

Влияние сроков откорма на метаболиты крови свиней породы ландрас и их двухпородных гибридов..... 872

Г. Н. Левина, А. И. Назаренко

Продуктивные и функциональные признаки первотелок трех генотипов при разных системах доения..... 885

ВЕТЕРИНАРНАЯ МЕДИЦИНА

О. Г. Лаптева, А. В. Луницин, А. А. Чадаева, О. С. Поголяева, А. Ю. Кольцов, С. Г. Юрков

Культуральные свойства и генетическая характеристика штамма Gil-Gil вируса блютанга..... 896

М. Е. Власов, Д. А. Кудряшов, И. П. Синдрякова, С. Ю. Моргунов, И. А. Титов

Однократная иммунизация аттенуированным штаммом «Волгоград/14с» вируса АЧС не защищает поросят от заражения гомологичным штаммом «Ставрополь 01/08»..... 906

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ

И. А. Старостин, А. С. Овчаренко, К. С. Дмитриев

Исследование параметров подвески платформы для селекционно-семеноводческих работ методом имитационного моделирования..... 917

З. А. Годжаев, А. В. Колесников

Обоснование параметров конструкции и режимов работы устройства для обмола семян зернобобовых культур..... 929

ХРОНИКА

Памяти ученого. Павел Николаевич Сисягин..... 937

CONTENTS

REVIEWS

<i>Irina S. Kozhevnikova, Aleksandra O. Stupina, Inga A. Klassen</i> The role of somatotrophic axis genes in regulating the productivity traits of dairy and beef cattle (review).....	713
<i>Olga A. Burova, Ekaterina A. Shirokova, Tatiana V. Ovsyukhno, Tatiana N. Demidova, Ivan V. Yashin, Andrey A. Blokhin</i> Aspects of biosecurity of pig feed production (review).....	725
<i>Kseniya S. Inchagova, Irina A. Vershinina</i> Prospects for the use of shrubs of the European part of Russia in animal husbandry (review).....	737

ORIGINAL SCIENTIFIC ARTICLES

PLANT GROWING

<i>Elena S. Parfenova, Ekaterina A. Psareva</i> Analysis of the adaptive and productive potential of winter rye cultivars of Vyatka breeding.....	749
<i>Bagrat I. Sandukhadze, Lyudmila A. Marchenkova, Ramin Z. Mamedov, Olga V. Pavlova, Valentina V. Bugrova, Maria S. Krahmaleva, Raisa F. Chavdar, Tatiana G. Orlova, Evgeniy V. Savinov</i> The reaction of winter bread wheat cultivars to the stress effects of biotic and abiotic environmental factors.....	760
<i>Oksana S. Amunova</i> 'Temp' is a new cultivar of spring bread wheat.....	773
<i>Olga D. Golyaeva, Anastasia V. Alpatova</i> Study of red currant cultivars based on the characteristics of small-sized seeds and a small number of seeds.....	781
<i>Anastasia O. Savina, Alexander V. Shmygov, Olga A. Kiseleva</i> Flowering and fruiting characteristics of new blue honeysuckle hybrids in the conditions of the Sverdlovsk region.....	788

PLANT PROTECTION

<i>Sergey R. Fasulati, Olga V. Ivanova</i> The results of the potato cultivars study for resistance to the Colorado potato beetle using two field methods.....	797
<i>Vasiliy V. Smuk</i> Dynamics of deterioration of phytosanitary indicators of tubers with an increase in potato productivity during the pre-harvest vegetation period.....	807

STORAGE AND PROCESSING OF AGRICULTURAL PRODUCTION

<i>Dilyara F. Ziatdinova, Rushan G. Safin, Elena N. Soloveva</i> Modeling of oil extraction process from sea buckthorn products.....	816
<i>Maxim A. Shadrin, Nina V. Burakovskaya, Elena A. Moliboga, Natalia V. Shchukina, Maria I. Pristavka</i> Optimization of craft beer fermentation process by means of Table Curve system modeling.....	827

AGRICULTURE, AGROCHEMISTRY, LAND IMPROVEMENT

<i>Dmitry A. Rogachev</i> Improving the efficiency of water use management of irrigation systems: methodology and technology.....	840
--	-----

ZOOTECHNY

<i>Vasiliy M. Kuznetsov</i> The polymorphism information content of the STR loci in the samples of breeding bulls of three breeds.....	852
<i>Nikita S. Kolesnik, Olga N. Sivkina, Oksana A. Voronina, Anastasia A. Savina, Sergey Yu. Zaytsev</i> The effect of fattening periods on blood metabolites of Landrace pigs and their two-breed hybrids.....	872
<i>Galina N. Levina, Alexander I. Nazarenko</i> Productive and functional traits of first-calf heifers of three genotypes by different systems of milking.....	885

VETERINARY MEDICINE

<i>Oksana G. Lapteva, Andrey V. Lunitsin, Anna A. Chadaeva, Olga S. Povolayaeva, Andrey Y. Koltsov, Sergey G. Yurkov</i> Cultural properties and genetic characteristics of the Gil-Gil strain of the bluetongue virus.....	896
<i>Mikhail E. Vlasov, Dmitriy A. Kudryashov, Irina P. Sindryakova, Sergey Yu. Morgunov, Iliy A. Titov</i> Single immunization with the attenuated strain "Volgograd/14c" of the ASF virus does not protect piglets from infection with the homologous strain "Stavropol 01/08".....	906

MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

<i>Ivan A. Starostin, Alexander S. Ovcharenko, Kirill S. Dmitriev</i> Research of the platform suspension parameters for breeding and seed production works using the method of simulation modeling.....	917
<i>Zachid A. Godzhaev, Aleksey V. Kolesnikov</i> Justification of design parameters and operating modes of a device for threshing seeds of grain legumes.....	929

CHRONCLE

In memory of the scientist. Pavel Nikolaevich Sisyagin.....	937
---	-----

ОБЗОРЫ/REVIEWS

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.713-724>

УДК 636.082



Роль генов соматотропной оси в регуляции продуктивных качеств молочного и мясного скота (обзор)

© 2025. И. С. Кожевникова ✉, А. О. Ступина, И. А. Классен

ФГБНУ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, г. Архангельск, Российская Федерация

Соматотропин играет важную роль в регулировании процессов роста, метаболизма и развития у крупного рогатого скота. Этот гормон действует через сложную сеть белковых взаимодействий, известную как соматотропная ось, которая отвечает за координацию обмена веществ и различных физиологических процессов у млекопитающих. Цель обзора – систематизировать современные данные о влиянии генов соматотропной оси (GH, GHR, IGF-1 и др.) на продуктивные качества крупного рогатого скота (молочную и мясную продуктивность), а также оценить перспективы их использования в селекционных программах животноводства. Множество аллельных вариантов генов, ассоциированных с соматотропной осью, оказывает значительное влияние на ключевые экономические показатели, такие как молочная продуктивность и состав молока, характеристики туши, уровень мясной продукции и репродуктивные способности животных. Генетические варианты гена GH влияют на такие параметры, как удой, содержание жира и белка в молоке, продолжительность лактации. Некоторые генотипы, например GH^{LL}, способны обеспечить более высокий удой, однако они характеризуются пониженным содержанием жира и белка. В то же время другие генотипы, такие как GH^{VL}, могут повышать содержание жира в молоке, но одновременно снижать общий удой. Взаимодействия GH с другими генами также играют важную роль в определении молочной продуктивности. В этом контексте рекомбинантный соматотропин активно используется для повышения продуктивных характеристик у коров, особенно в молочном скотоводстве. Применение рекомбинантного соматотропина крупного рогатого скота (rBGH) в кормлении коров в средние и поздние периоды лактации способствует активации механизмов, которые влияют на увеличение молочной и мясной продуктивности. Несмотря на существующие обширные данные, исследования генетической изменчивости гена гормона роста у различных пород крупного рогатого скота остаются актуальными и востребованными. В этом контексте разработка персонализированных схем применения rBGH, учитывающих генетические особенности животных, направлена на повышение продуктивности при сохранении их здоровья и качества продукции, что требует комплексных исследований для определения оптимальных дозировок, режимов введения и оценки их влияния на физиологическое состояние животных различных генотипов в течение продуктивного цикла.

Ключевые слова: соматотропин, генотип, полиморфизм, крупный рогатый скот, рекомбинантный соматотропин

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук (тема № FUW-2024-0006).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Кожевникова И. С., Ступина А. О., Классен И. А. Роль генов соматотропной оси в регуляции продуктивных качеств молочного и мясного скота (обзор). Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(4):713–724. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.713-724>

Поступила: 14.10.2024

Принята к публикации: 04.07.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

The role of somatotrophic axis genes in regulating the productivity traits of dairy and beef cattle (review)

© 2025. Irina S. Kozhevnikova ✉, Aleksandra O. Stupina, Inga A. Klassen

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Archangelsk, Russian Federation

Somatotropin plays a crucial role in regulating growth, metabolism, and development in cattle. This hormone acts through a complex network of protein interactions known as the somatotrophic axis, which coordinates metabolic and physiological processes in mammals. The aim of this review is to systematize current data on the influence of somatotrophic axis genes (GH, GHR, IGF-1, etc.) on cattle productivity (both dairy and beef traits) and assess their potential use in livestock breeding programs. Numerous allelic variants of genes associated with the somatotrophic axis significantly impact key economic indicators, such as milk yield and composition, carcass characteristics, meat production levels, and reproductive

performance. Genetic variants of the GH gene affect parameters including milk yield, fat and protein content, and lactation efficiency. For example, certain genotypes (e.g., GH^{LL}) may increase milk production but reduce fat and protein content, while others (GH^{VL}) can enhance milk fat while decreasing overall yield. Interactions between GH and other genes also play a key role in determining dairy productivity. Recombinant bovine somatotropin (rBGH) is widely used to enhance productivity in dairy cattle, particularly during mid-to-late lactation, by activating mechanisms that improve milk and meat yields. Despite extensive existing research, studies on the genetic variability of the growth hormone gene across different cattle breeds remain relevant and in demand. In this context, the development of personalized rBGH administration protocols-tailored to the genetic profiles of animals-aims to maximize productivity while maintaining animal health and product quality. This necessitates comprehensive research to determine optimal dosages, administration regimens, and their effects on the physiological state of animals with different genotypes throughout their productive cycles.

Keywords: somatotropin, genotype, polymorphism, cattle, recombinant somatotropin

Acknowledgement: 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 N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (theme No. FUW-2024-0006).

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: Kozhevnikova I. S., Stupina A. O., Klassen I. A. The role of somatotrophic axis genes in regulating the productivity traits of dairy and beef cattle (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):713–724. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.713-724>

Received: 14.10.2024

Accepted for publication: 04.07.2025

Published online: 29.08.2025

Соматотропин играет ключевую роль в регуляции роста, метаболизма и развития у крупного рогатого скота. Интерес к соматотропину продолжает расти в сфере научных исследований и сельскохозяйственной практики, поскольку эффективное управление его выработкой может оказать значительное влияние на производственные характеристики скота, такие как увеличение массы тела, возраст первого осеменения, молочную продуктивность, качество мяса.

Понимание механизмов действия соматотропина, его взаимодействия с другими гормонами и влияние на здоровье животных имеет важное значение для разработки эффективных и безопасных стратегий его применения. Кроме того, в условиях повышения требований к благополучию животных и экологической устойчивости, изучение долгосрочных эффектов соматотропина на организм крупного рогатого скота является необходимым для обеспечения устойчивого развития отрасли.

Таким образом, обзор существующих данных о соматотропине поможет выявить пробелы в знаниях и наметить направления для будущих исследований, способствуя оптимизации его использования в сельском хозяйстве.

Цель обзора – систематизировать современные данные о влиянии генов соматотропной оси (GH, GHR, IGF-1 и др.) на продуктивные качества крупного рогатого скота (молочную и мясную продуктивность), а также оценить перспективы их использования в селекционных программах животноводства.

Материал и методы. Поиск осуществляли с использованием следующих ключевых слов и их комбинаций на русском – "соматотропная ось", "GH-IGF система", "полиморфизмы гена GH" и английском языках – "somatotrophic axis", "growth hormone gene", "IGF-1".

Использовали следующие базы данных электронных библиотек: eLibrary (<https://elibrary.ru/>), ScienceDirect (<https://www.sciencedirect.com/>), Semantic Scholar (<https://www.semanticscholar.org/>) и PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>), Scopus (<https://www.scopus.com/>).

Критерии включения публикаций: исследования, посвященные роли генов соматотропной оси (GH, GHR, IGF-1) в регуляции продуктивных качеств крупного рогатого скота; публикации в рецензируемых научных журналах; исследования, содержащие экспериментальные данные или мета-анализ.

Критерии исключения: статьи без полного текста; материалы конференций без рецензирования; исследования на других видах животных.

Географический охват исследований включал работы ученых из России, стран Европы, Северной и Южной Америки, Азии. Особое внимание уделялось исследованиям, проведенным на молочных и мясных породах крупного рогатого скота. Было проанализировано 49 научных публикаций.

Основная часть. Ген соматотропина. Гормон роста или соматотропин (GH) – это пептидный гормон, регулирующий метаболизм, а также рост позвоночных животных. Ген соматотропина локализован на девятнадцатой хромосоме (BTA19) и состоит в мультигенном

семействе, включающем пролактин и плацентарные лактогены. Данный ген охватывает около 1800 пар оснований и структурно состоит из пяти экзонов (I-V), которые в совокупности формируют мРНК длиной 786 пар оснований и кодируют полипептид из 217 аминокислот, сопровождаемый четырьмя интронами (A-D). Стоит отметить, что последовательности гена гормона роста у крупного рогатого скота, мышей и человека демонстрируют значительное сходство [1, 2].

В пятом экзоне бычьего гена GH обнаружен полиморфный сайт. Точечная мутация в позиции 2141 (трансверсия цитозина в гуанин) была выявлена эндонуклеазой AluI и привела к изменению аминокислотной последовательности: лейцин (L) заменен на валин (V) в позиции 127 белковой цепи бычьего GH [3, 4].

Например, И. В. Ткаченко с соавтором выявили, что у коров-первотёлок чёрно-пёстрой породы с генотипом GH^{LL} за 305 дней лактации получены достоверно более высокие показатели по удою в сравнении с гетерозиготными сверстницами [5]. При исследовании продуктивных признаков коров чёрно-пёстрой породы с разными комплексными генотипами GH и TG К. Д. Сабетова с соавторами установили достоверную взаимосвязь аллелей GH^L и TG^T с показателями массовой доли жира и белка в молоке [6]. И. Ю. Долматова и И. Г. Ильясов в своей статье отмечали, что у коров бестужевской и чёрно-пёстрой пород с генотипом GH^{VL} был зафиксирован более высокий выход молочного жира по сравнению с коровами, у которых генотипы были гомозиготными GH^{LL} и GH^{VV} – разница составила 55,4 и 30,9 кг соответственно. Авторы также отметили, что у гетерозиготных коров чёрно-пёстрой породы был обнаружен более высокий уровень удоя по сравнению с коровами, имеющими гомозиготные генотипы [7]. При исследовании влияния гена соматотропина на показатели молочной продуктивности у коров холмогорской породы в работах Р. Р. Шайдуллина с соавторами показано, что животные носители генотипа GH^{LL} имели достоверное преимущество перед половозрастными коровами с генотипами GH^{VL} и GH^{VV} по удою [8]. В. Л. Ялуга с соавторами в своих исследованиях также отметили, что коровы-обладательницы генотипа GH^{LL} по сравнению с носительницами генотипа GH^{VL} характеризовались бóльшим удоем (на 419 кг), но более низкой массовой долей жира и белка в молоке (на 0,21 и 0,16 % соответственно) [9].

М. В. Позовникова с соавторами, изучая аллельный полиморфизм генов β -лактоглобулина, пролактина и соматотропина в группе коров айрширской породы, выявили, что у коров с генотипом GH^{LL} удои были достоверно выше, чем у коров с генотипом GH^{VL}, как и у коров с генотипом GH^{VL} относительно коров с генотипом GH^{VV} [10].

М. Е. Михайлова и Е. В. Белая установили, что скот голштинской породы с аллелем GH^L имел лучшие показатели по удою и белку, а коровы с аллелью GH^V отличались высоким показателем жирномолочности [11]. Н. Ю. Сафина с соавторами выявили у коров-первотёлок лучшие результаты по молочной продуктивности и качественному составу молока у животных с генотипом GH^{LL} [12]. В исследованиях А. В. Перчуна с соавторами показано, что коровы костромской породы с генотипом GH^{LL} превосходили коров с генотипом GH^{VL} по удою и белку, тогда как коровы с генотипом GH^{VL} отличались высоким содержанием молочного жира [13].

А. Н. Михайлюк с соавторами, проанализировав комплексное влияние генотипов О-ацилтрансферазы 1 (DGAT1), соматотропина, пролактина (PRL) и бета-лактоглобулина (BLG) на показатели молочной продуктивности у коров голштинской породы в разрезе первой, второй и третьей лактаций, установили, что животные с комплексным генотипом DGAT1^{KK}GH^{LL}PRL^{AA}BLG^{AB} имели высокие показатели массовой доли жира и количества молочного жира в молоке, в других комбинациях комплексных генотипов (DGAT1^{KK}GH^{LL}PRL^{AB}BLG^{AB}, DGAT1^{KK}GH^{LL}PRL^{AA}BLG^{AA}) генотип GH^{LL} оказывал положительное влияние на удои коров по первой и второй лактациям [14].

Имеются исследования влияния гена соматотропина на качественные показатели мясной продуктивности посредством действия гормона соматотропина на энергию роста и липидный обмен. Установлено, что масса туши у животных герефордской породы с генотипом GH^{VV} больше на 5-10 кг в сравнении с остальными генотипами [15, 16]. А. Пэл, А. К. Чакраварти (A. Pal, A. K. Chakravarty) подтверждает, что животные с генотипом GH^{LL} имеют наиболее высокую массу тела при рождении, а также в возрасте 3 и 6 мес., что значительно влияет на скорость их роста [17].

Многие исследователи указывают на позитивное влияние аллеля GH^L гена соматотропина на рост и развитие молодняка. А. А. Некрасов с соавторами изучали молодняк голштинской

породы и выяснили, что наиболее высокий среднесуточный прирост в период от рождения до 18 месяцев имели телки с четырьмя комплексными генотипами bGH^{LL} – bPRL^{AA} – κ-CN^{AA} – PIT-1^{AB} [18]. М. В. Урядникова и И. Х. Улубаева в своем исследовании отметили первенство по живой массе у коров с генотипом GH^{LL} не только за первую лактацию, но и за вторую, и третью [19]. А. А. Ярышкин и соавторы показали, что телки голштинизированной черно-пестрой породы с генотипом GH^{LL} набирают оптимальный вес для осеменения раньше, чем телки той же породы с генотипами GH^{VL} и GH^{VV} [20].

Полиморфизм гена соматотропина также связывают с частотой хромоты у крупного рогатого скота. Исследование, проведенное на коровах голштинской породы показало, что помимо влияния факторов окружающей среды, таких как год отела, сезон, возраст, немаловажное значение имел генотип гена GH у животных. У особей с гетерозиготным генотипом вероятность развития хромоты значительно ниже, чем у представителей других генотипов [21].

В интроне 3 в позиции 1547 был установлен полиморфный сайт эндонуклеазой рестрикции Msp I. В ряде исследований сообщалось о взаимосвязи генотипов, полученных от Msp I с молочной продуктивностью крупного рогатого скота. Однако в некоторых исследованиях отмечалось расхождение в полиморфизме генов и ассоциации по отношению к целевому локусу [22].

В исследовании, проведенном С. Сачан с соавт. (S. Sachan et al.), было установлено, что аллель Т преобладает у крупного рогатого скота породы сахивал. Коровы с генотипом DD демонстрировали значительно более высокую молочную продуктивность в первую лактацию (305 дней), включая общее количество выработанного молока и продолжительность лактационного периода в сравнении с особями, обладающими генотипами CD и CC [23]. Ю. К. Бангар и его коллеги (Y. C. Bangar et al.) пришли к иным выводам. В своем обзоре выявили, что животные разных пород, несущие аллель С, имеют значительную связь с увеличением удоя, особенно в начальные периоды лактации [22].

Авторы исследования пришли к выводу, что у гибридного крупного рогатого скота (голландская × египетская балади) гетерозиготные генотипы (CD) демонстрируют значительную корреляцию с содержанием сухого

вещества, белка и лактозы. В отличие от них, генотипы DD характеризуются более низким содержанием этих компонентов по сравнению с CD и CC. Также была обнаружена слабая связь между удоем за 305 дней и содержанием жира в молоке. Однако у коров голштинско-фризской породы такая зависимость отсутствует как в гомозиготных, так и гетерозиготных генотипах [24].

Соматотропная ось. Гормон роста действует через сложную сеть взаимодействий белков, известную как соматотропная ось, представляющая собой эволюционно сохранённый сигнальный путь, участвующий в ряде фундаментальных биологических процессов, включая клеточный рост, пролиферацию, дифференцировку и поддержание гомеостаза у животных [25].

Соматотропная ось включает в себя гены, которые кодируют сам гормон роста, инсулиноподобный фактор роста 1 (ИФР-1, IGF-1), а также их рецепторы – гормона роста (GHR) и инсулиноподобного фактора роста (IGFR), кроме этого в состав входят гены нескольких внутриклеточных сигнальных белков [26]. Соматотропин через соматотропную ось контролирует распределение питательных веществ у молочных коров в начале лактации [27].

Гормон роста и инсулиноподобный фактор роста 1 выступают в роли мощных регуляторов роста как отдельных тканей, так и организма в целом. Гормон роста инициирует рост тканей и стимулирует общий рост организма через образование ИФР-1, который преимущественно синтезируется в печени под воздействием GH. Также GH активирует процесс роста тканей через механизмы, не связанные с ИФР-1. Инсулиноподобный фактор роста 1 стимулирует развитие тканей организма через эндокринные, паракринные и аутокринные механизмы действия. Разнообразные механизмы действия, а также взаимодействие гормона роста и инсулиноподобного фактора роста 1 затрудняют точное определение их относительной роли в процессе роста и развития тканей организма [28, 29].

Среди сигнальных путей соматотропной оси путь JAK2-STAT5 является основным для реализации воздействия GH на транскрипцию генов в печени [30]. Путь JAK-STAT включает три основных компонента: рецепторы; янускиназы (JAK) и преобразователи сигналов; активаторы транскрипции (STATs). Семейство JAK млекопитающих состоит из JAK1, JAK2,

ЯК3 и тирозинкиназы 2 (ТΥΚ2), которые связаны с цитоплазматическими доменами различных цитокиновых рецепторов. Представители семейства STAT играют важную роль в процессах клеточного роста, дифференцировки, выживания, апоптоза и развития молочной железы [31]. Исследования показали, что условное ингибирование (conditional inhibition) STAT5 в первые 10 дней лактации приводит к снижению массы тела новорождённых на 30–40 % в результате изменений морфологии молочных желез и уменьшения выработки молока. Ингибирование STAT5a (изоформа STAT5) подавляет нормальное развитие и дифференцировку молочной железы в период беременности, тогда как делеция STAT5b (изоформа STAT5) в основном ухудшает общий рост организма [32].

Путь JAK2-STAT5 играет ключевую роль в транскрипционном действии GH на инсулиноподобный фактор роста 1 и выступает в роли супрессора цитокиновой сигнализации 2 (SOCS2). IGF-1 является митогенным фактором для различных типов клеток, тогда как GH-индуцированная продукция IGF-1 в печени является основным источником циркулирующего IGF-1 в организме [30].

Белки-супрессоры передачи сигналов цитокинов (SOCS) являются ингибиторами пути JAK-STAT и действуют как классическая петля отрицательной обратной связи, которая модулирует чувствительность клеток к цитокинам, впервые обнаруженная в 1997 году различными группами ученых [33, 34]. Л. А. Винкельман с соавт. (L. A. Winkelman et al.) сделали вывод, что повышенное содержание SOCS-2 в печени может нарушить способность GH к выработке ИФР-1 в печени коровы после отела [35].

У молочного скота начало лактации сопровождается интенсивной выработкой молока, при этом не происходит адекватного увеличения потребления энергии. Это приводит к значительному энергетическому дефициту в первые недели после родов. В этот период также наблюдается резистентность к гормону роста, что подтверждается снижением уровня IGF-1 в плазме крови, несмотря на его повышенные уровни в сыворотке [36]. Исследования показали, что одной из причин резистентности к гормону роста в печени является уменьшение количества его рецепторов, вызванное снижением экспрессии специфичного для печени транскрипта рецептора GHR1A [37, 38].

Отрицательный энергетический баланс (ОЭБ) является метаболическим расстройством, наблюдаемым у высокопродуктивных коров. Это состояние характеризуется снижением уровней глюкозы, инсулина и инсулиноподобного фактора роста 1, а также повышением концентраций неэтерифицированных жирных кислот (NEFA), β -гидроксимасляной кислоты (BHBA) и гормона роста в плазме. В период ОЭБ происходит разобщение соматотропной оси вследствие подавления экспрессии рецептора гормона роста в печени, что приводит к формированию эндокринной среды, способствующей прямому влиянию гормона роста на липолиз и глюконеогенез в начале лактации [37].

С увеличением молочной продуктивности репродуктивные способности коров снижаются. В течение лактации энергетический баланс молочного скота становится отрицательным – это происходит в результате несоответствия между потребностью в питательных веществах и их расходом [3].

У маточного поголовья, имеющего положительный энергетический баланс, соматотропин высвобождается из передней доли гипофиза и стимулирует выработку ИФР-1 из печени. ИФР-1 снижает скорость высвобождения гормона роста, а также играет роль сенситизатора инсулина, тем самым помогая периферическим тканям поглощать глюкозу [39].

Рекомбинантный соматотропин. В области животноводства, особенно в молочном скотоводстве, рекомбинантный соматотропин активно применяется для стимуляции продуктивных показателей коров. Это искусственный гормон роста, синтезируемый с помощью технологии рекомбинантной ДНК [40]. Ученые идентифицировали ген, ответственный за выработку естественного bST, и, используя стандартные методы генной инженерии, дублировали ген и встроили его в ДНК бактерий *E. coli* [41]. Многочисленные исследования показали, что рекомбинантный соматотропин крупного рогатого скота (rBST) увеличивает молочную продуктивность и эффективность кормления у лактирующих коров, согласно обзору, проведенному Н. Р. Сен-Пьер с соавторами (N. R. St-Pierre et al.) [42].

Применение rBGH у лактирующих молочных коров способствовало увеличению глюконеогенеза в печени, а также подавляло ингибирующее воздействие инсулина на этот процесс, что, в свою очередь, влекло за собой увеличение полного окисления жирных кислот

в клетках печени и улучшило метаболические параметры. Однако влияние rBGH на метаболические индикаторы и общее состояние здоровья коров в период родов остается относительно неясным [39]. В частности, лечение коров в период родов с использованием дозы 500 мг rBGH каждые 14 дней приводило к увеличению уровня глюкозы, снижению концентрации жирных кислот и бета-гидроксibuтирата, а также к росту удоев молока. Снижение дозы rBGH до диапазона от 142,8 до 325,0 мг каждые 14 дней в предродовом периоде также способствовало увеличению уровней инсулина, ИФР-1 и глюкозы, однако влияние на удои и показатели молока проявлялось с различной степенью выраженности [43].

В недавнем эксперименте Р. Б. Сильва с соавт. (P. R. B. Silva et al.) [44] коровы голштинской породы получали 0, 87,5 и 125 мг rBGH еженедельно, у коров, получавших 125 мг, наблюдали повышение концентрации ИФР-1, улучшение ответов, связанных с врожденным и адаптивным иммунитетом, и снижение концентраций бета-гидроксibuтирата. При этом, согласно результатам данного эксперимента, rBGH не оказывал прямого влияния на функцию печени, так как не было выявлено значимых изменений в содержании общих липидов, триглицеридов или гликогена в печени. Однако наблюдаемое снижение концентрации бета-гидроксibuтирата в группе коров, получавших 125 мг rBGH, может косвенно влиять на метаболические процессы, происходящие в печени, что, вероятно, связано с изменениями в метаболизме жиров. Кроме того, в этой же группе коров отмечено снижение уровня гаптоглобина, что указывает на снижение воспалительных процессов и, как следствие, на снижение нагрузки на печень [44, 45].

Коровы голштинской породы, содержащиеся в полупривязных условиях, показали лучшую продуктивность и состояние здоровья при введении 500 мг rBST на 63-й день лактации. Анализ соотношения дозы и интервала применения показал на оптимальный уровень rBST в крови, который составляет от 20,8 до 35,7 мг в сутки для достижения максимального эффекта. Применение rBST не оказало значительного влияния на уровень соматических клеток и количество случаев клинического мастита. Тем не менее, лечение препаратом в дозе 500 мг способствовало увеличению числа дней для оплодотворения животных, количества осеменений

на одно зачатие, частота которых при первом осеменении осталась без изменений [46]. Г. Грассиель с соавт. (G. Grassiele et al.) отметили повышение показателя частоты стельности при искусственном осеменении, а также скорости роста фолликулов при введении rBST [47].

В результате исследования влияния rBST на репродуктивную функцию крупного рогатого скота Ф. А. Оливейра и соавт. (F. A. Oliveira et al.) не обнаружили связи между введением рекомбинантного соматотропина и частотой овуляции и динамикой фолликулов [48].

Р. Баррейро с соавторами (R. Barreiro et al.) проводили исследование для определения воздействия rBST на состав молока крупного рогатого скота. На протяжении 37 недель у коров, которым вводили рекомбинантный соматотропин, определяли жировой и минеральный состав молока. Ученые выявили, что в отличие от контрольной группы животных ($n = 3$), у экспериментальной ($n = 6$) отмечено низкое разнообразие жирных кислот, выраженное в преобладании фракции мононенасыщенных жирных кислот, помимо этого зафиксировано пониженное содержание калия и кальция в молоке. Низкое разнообразие жирных кислот, а также дефицит минеральных элементов отражает низкую питательную ценность производимого молока [49].

Заключение. Таким образом, генетические вариации соматотропина существенно влияют на продуктивность и здоровье крупного рогатого скота, затрагивая такие показатели, как молочная и мясная продуктивность, а также рост и развитие животных. Нарушения в функционировании соматотропной оси, вызванные, например, энергетическим дефицитом, могут приводить к снижению уровня IGF-1, возникновению резистентности к гормону роста, а также к негативным последствиям для молочной продуктивности и репродуктивных функций. Применение рекомбинантного соматотропина может иметь неоднозначные эффекты на организм животных, включая влияние на качество молока, репродуктивные способности и общее состояние здоровья.

В связи с этим необходимо проведение дальнейших исследований, направленных на определение оптимальных дозировок и режимов применения rBGH, с целью максимизации продуктивности при минимизации рисков для здоровья коров и сохранения качества молока.

Список литературы

1. Бейшова И. С. Фенотипические эффекты генов соматотропинового каскада, ассоциированных с мясной продуктивностью у коров казахской белоголовой породы. Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2018;(1):48–53.
Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35019210> EDN: OTEFVL
2. Bordonaro S., Tumino S., Marletta D., De Angelis A., Di Paola F., Avondo M., Valenti B. Effect of GH p.L127V Polymorphism and Feeding Systems on Milk Production Traits and Fatty Acid Composition in Modicana Cows. Animals. 2020;10(9):1651. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani10091651>
3. Balogh O., Kovacs K., Kulcsar M., Gáspárdy A., Zsolnai A., Kátai L. et al. AluI polymorphism of the bovine growth hormone (GH) gene, resumption of ovarian cyclicity, milk production and loss of body condition at the onset of lactation in dairy cows. Theriogenology. 2009;71(4):553–559.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2008.06.032>
4. Шевцова А. А., Климов Е. А., Ковальчук С. Н. Обзор вариативности генов, связанных с молочной продуктивностью крупного рогатого скота. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018;(11-1):194–200. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36493474> EDN: YOWPLF
5. Ткаченко И. В., Гридина С. Л. Влияние полиморфных вариантов генов каппа-казеина и гормона роста на молочную продуктивность первотелок уральского типа. Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2018;(5):87–95. DOI: <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2018-5-87-95> EDN: YQVNSX
6. Сабетова К. Д., Чаицкий А. А., Лемякин А. Д., Щеголев П. О. Продуктивные признаки коров чёрно-пёстрой породы с разными комплексными генотипами по генам GH и TG в условиях племенрепродукторов Костромской области. Вестник АПК Верхневолжья. 2023;(3(63)):49–59.
DOI: <https://doi.org/10.35694/YARCX.2023.63.3.006> EDN: RMVMSM
7. Долматова И. Ю., Ильясов И. Г. Полиморфизм гена гормона роста крупного рогатого скота в связи с молочной продуктивностью. Генетика. 2011;47(6):814–820. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1022795411060081> EDN: NWCKGB
8. Шайдуллин Р. Р., Загидуллин Л. Р., Ахметов Т. М., Халилова Г. Х. Оценка молочной продуктивности холмогорских коров с аллельными вариантами генов пролактина и соматотропина. Аграрный научный журнал. 2022;(3):75–78. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i3pp75-78> EDN: LBZXAT
9. Ялуга В. Л., Прожерин В. П., Хабибрахманова Я. А., Калашникова Л. А., Багаль И. Е. Полиморфизм генов CSN3, LGB, PRL, GH, LEP у холмогорских коров. Молочное и мясное скотоводство. 2018;(4):5–8.
Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35325822> EDN: XULDBR
10. Повозникова М. В., Тулинова О. В., Погорельский И. А., Сердюк Г. Н. Генетическая структура айрширского скота по однонуклеотидным ДНК-маркерам и влияние их генотипов на молочную продуктивность. Генетика и разведение животных. 2015;(2):22–27.
Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24389576> EDN: UNSQOD
11. Михайлова М. Е., Белая Е. В. Влияние полиморфных вариантов генов соматотропинового каскада bGH, bGHR и bIGF-1 на признаки молочной продуктивности у крупного рогатого скота голштинской породы. Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2011;55(2):63–69.
Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30053537> EDN: ZHREYR
12. Сафина Н. Ю., Гилемханов И. Ю., Зиннатова Ф. Ф., Шакиров Ш. К. Характеристика молочной продуктивности коров-первотёлок с разными генотипами соматотропина (GH). Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2019;14(3):58–61.
DOI: https://doi.org/10.12737/article_5db9535ed384a3.87060395 EDN: RPJVBP
13. Перчун А. В., Лазебная И. В., Белокуров С. Г., Рузина М. Н., Сулимова Г. Е. Полиморфизм генов CSN3, bPRL и bGH у коров костромской породы в связи с показателями молочной продуктивности. Фундаментальные исследования. 2012;(11–2):304–308. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18318436> EDN: PKWKUH
14. Михалюк А. Н., Танана Л. А., Кузьмина Т. И. Ассоциация комплекса полиморфных вариантов генов DGAT1, GH, PRL и BLG с показателями молочной продуктивности коров голштинской породы молочного скота отечественной селекции. Генетика и разведение животных. 2023;(1):74–83.
DOI: <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2023-1-74-83> EDN: HOYEXJ
15. Танана Л. А., Вертинская О. В., Кизилевич К. О., Лебедько Е. Я. Убойные и качественные показатели мяса герефордских быков в зависимости от генотипов гена соматотропина. Вестник Брянской ГСХА. 2019;(6(76)):40–44. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41466924> EDN: XHRYBT
16. Sedykh T. A. Association between gene polymorphism of growth hormone and growth performance of meat bulls. Nauka i studia. 2016;23:10–13.
17. Pal A., Chakravarty A. K. Mutations in growth hormone gene affect stability of protein structure leading to reduced growth, reproduction, and milk production in crossbred cattle—an insight. Domestic Animal Endocrinology. 2020;71:106405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2019.106405>

18. Некрасов А. А., Попов А. Н., Попов Н. А., Федотова Е. Г. Влияние полиморфизма генов молочных белков и гормонов на энергию роста телок черно-пестрой голштинской породы. Таврический научный обозреватель. 2016;(5-2(10)):91–95. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26249580> EDN: WCKXKH
19. Урядников М. В., Улубаев И. Х. Оценка аллелей и генотипов соматотропина по полиморфизму и живой массе коров черно-пестрой породы. Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2011;(3(77)):80–83. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15615380> EDN: NDSMTJ
20. Ярышкин А. А., Шаталина О. С., Лешонок О. И. Ассоциации полиморфных вариантов гена соматотропина с хозяйственно-ценными показателями коров. Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2021;(2):60–70. DOI: <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2021-2-60-70> EDN: WKTPCT
21. Ferchichi M. A., Jemmali B., Bel Larbi M., Ben Gara A. Genetic polymorphism of the growth hormone (GH) gene and its effect on the incidence of lameness in dairy cows in Tunisia. Journal of new sciences. 2021;81(2):4696–4701. URL: <https://www.jnsiences.org/agri-biotech/116-volume-81/665-genetic-polymorphism-of-the-growth-hormone-gh-gene-and-its-effect-on-the-incidence-of-lameness-in-dairy-cows-in-tunisia.html>
22. Bangar Y. C., Magotra A., Yadav A. S., Patil C. S. Meta-analysis of MspI derived variants of growth hormone gene associated with milk yield in dairy cattle. Growth Hormone & IGF Research. 2022;63:101459. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ghir.2022.101459>
23. Sachan S., Gupta I. D., Verma A., Vineeth M. R., Sinha R. Growth hormone-MspI loci polymorphism and its association with first lactation traits in Sahiwal cattle. Indian Journal of Animal Sciences. 2020;90(4):655–657. DOI: <https://doi.org/10.56093/ijans.v90i4.104226>
24. El-Nahas A., Basiony W. M., El-Kassas S., Mahmoud S. Variation in the Genetic Effects of ABCG2, Growth Hormone and Growth Hormone Receptor Gene Polymorphisms on Milk Production Traits in Egyptian Native, Holstein and Hybrid Cattle Populations. Pakistan Veterinary Journal. 2018;38(4):371–376. DOI: <https://doi.org/10.29261/pakvetj/2018.089>
25. Keogh K., Waters S. M., Kelly A. K., Wylie A. R. G., Kenny D. A. Effect of feed restriction and subsequent re-alimentation on hormones and genes of the somatotrophic axis in cattle. Physiol Genomics. 2015;47(7):264–273. DOI: <https://doi.org/10.1152/physiolgenomics.00134.2014>
26. Hax L. T., Schneider A., Jacometo C. B., Mattei P., Casarin da Silva T., Farina G., Corrêa M. N. Association between polymorphisms in somatotrophic axis genes and fertility of Holstein dairy cows. Theriogenology. 2017;88:67–72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.03.044>
27. Lucy M. C., Verkerk G. A., Whyte B. E., Macdonald K. A., Burton L., Cursons R. T. et al. Somatotrophic axis components and nutrient partitioning in genetically diverse dairy cows managed under different feed allowances in a pasture system. Journal of Dairy Science. 2009;92(2):526–539. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1421>
28. Zheng W., Leng X., Vinsky M., Li C., Jiang H. Association of body weight gain with muscle, fat, and liver expression levels of growth hormone receptor, insulin-like growth factor I, and beta-adrenergic receptor mRNAs in steers. Domestic Animal Endocrinology. 2018;64:31–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2018.03.008>
29. Mense K., Meyerholz M., Gil Araujo M., Lietzau M., Knaack H., Wrenzycki C. The somatotrophic axis during the physiological estrus cycle in dairy heifers – Effect on hepatic expression of GHR and SOCS2. Journal of Dairy Science. 2015;98(4):2409–2418. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8734>
30. Yu J., Zhao L., Wang A., Eleswarapu S., Ge X., Chen D., Jiang H. Growth hormone stimulates transcription of the fibroblast growth factor 21 gene in the liver through the signal transducer and activator of transcription 5. Endocrinology. 2012;153(2):750–758. DOI: <https://doi.org/10.1210/en.2011-1591>
31. Khan M. Z., Khan A., Xiao J., Ma Yu., Ma J., Gao J., Gao Zh. Role of the JAK-STAT Pathway in Bovine Mastitis and Milk Production. Animals. 2020;10(11):2107. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani10112107>
32. Tian M., Qi Y., Zhang X., Wu Zh., Chen J., Chen F. et al. Regulation of the JAK2-STAT5 Pathway by Signaling Molecules in the Mammary Gland. Frontiers Cell and Developmental Biology. 2020;8:604896. DOI: <https://doi.org/10.3389/fcell.2020.604896>
33. Huang Y., Zhao F., Luo C., Zhang X., Si Yu, Sun Zh. et al. SOCS3-Mediated Blockade Reveals Major Contribution of JAK2/STAT5 Signaling Pathway to Lactation and Proliferation of Dairy Cow Mammary Epithelial Cells in Vitro. Molecules. 2013;18(10):12987–13002. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules181012987>
34. Arun S. J., Thomson P. C., Sheehy P. A., Khatkar M. S., Raadsma H. W., Williamson P. Targeted Analysis Reveals an Important Role of JAK-STAT-SOCS Genes for Milk Production Traits in Australian Dairy Cattle. Frontiers in Genetics. 2015;6:00342. DOI: <https://doi.org/10.3389/fgene.2015.00342>
35. Winkelman L. A., Lucy M. C., Elsasser T. H., Pate J. L., Reynolds C. K. Short Communication: Suppressor of Cytokine Signaling-2 mRNA Increases After Parturition in the Liver of Dairy Cows. Journal of Dairy Science. 2008;91(3):1080–1086. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0433>
36. Kim J. W., Rhoads R. P., Block S., Overton T. R., Frank S. J., Boisclair Y. R. Dairy cows experience selective reduction of the hepatic growth hormone receptor during the periparturient period. Journal of Endocrinology. 2004;181(2):281–290. DOI: <https://doi.org/10.1677/joe.0.1810281>

37. Durante L. I., Angeli E., Etchevers L., Notaro U. S., Rodríguez F. M., Ortega H. H., Marelli B. E. Evaluation of the expression of growth hormone and its receptor during the resumption of postpartum ovarian follicle development in dairy cows. *Reproductive Biology*. 2024;24(1):100848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.repbio.2023.100848>
38. Caixeta L. S., Giesy S. L., Krumm C. S., Perfield J. W., Butterfield A., Boisclair Y. R. Fibroblast growth factor-21 (FGF21) administration to early-lactating dairy cows. II. Pharmacokinetics, whole-animal performance, and lipid metabolism. *Journal of Dairy Science*. 2019;102(12):11597–11608. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16696>
39. Davis A. N., Myers W. A., Chang C., Tate B. N., Rico J. E., Moniruzzaman M. et al. Somatotropin increases plasma ceramide in relation to enhanced milk yield in cows. *Domestic Animal Endocrinology*. 2021;74:106480. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2020.106480>
40. Zhao Y. Recombinant Bovine Somatotropin. Published under licence by IOP Publishing Ltd. 2020;440:022034. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/440/2/022034>
41. Jarvis L. S. The Potential Effect Of Two New Biotechnologies On The World Dairy Industry. Boca Raton: CRC Press, 1996. p. 168. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429314032>
42. St-Pierre N. R., Milliken G. A., Bauman D. E., Collier R. J., Hogan J. S., Shearer J. K. et al. Meta-analysis of the effects of sometribove zinc suspension on the production and health of lactating dairy cows. *Journal of the American Veterinary Medical Association*. 2014;245(5):550–564. DOI: <https://doi.org/10.2460/javma.245.5.550>
43. Silva P. R. B., Weber W. J., Crooker B. A., Collier R. J., Thatcher W. W., Chebel R. C. Hepatic mRNA expression for genes related to somatotrophic axis, glucose and lipid metabolisms, and inflammatory response of periparturient dairy cows treated with recombinant bovine somatotropin. *Journal of Dairy Science*. 2017;100(5):3983–3999. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12135>
44. Silva P. R. B., Machado K. S., Lobao Da Silva D. N., Moraes J. G. N., Keisler D. H., Chebel R. C. Effects of recombinant bovine somatotropin during the periparturient period on innate and adaptive immune responses, systemic inflammation, and metabolism of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2015;98(7):4449–4464. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8959>
45. Baruselli P. S., Elliff F. M., Silva L. G., Catuzzi B. L. Ch., Bayeux B. M. Estrategias para aumentar a producao de embrioes em bovinos. *Revista Brasileira de Reproducao Animal*. 2019;43(2):315–326. URL: <https://repositorio.usp.br/item/002956228>
46. Campos B. G., Lombardi M. C., Neto H. C. D., Lana A. M. Q., Pereira M. N., Rabelo E. et al. How to use recombinant bovine somatotropin in crossbred Holstein x Gyr (¾ and 7/8) cows? *Tropical Animal Health and Production*. 2022;1–11. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1702713/v1>
47. Gasseferth G., Gaievski F. R., Bergstein-Galan T. G., Junior A. G., Bragato A., Valle V. M. et al. Effect of recombinant bovine somatotropin on the reproductive efficiency of beef cows subjected to differently timed-artificial insemination protocols. *Reproduction in Domestic Animals*. 2023;58(12):1654–1661. DOI: <https://doi.org/10.1111/rda.14479>
48. Oliveira F. A., Almeida I. C., Sena L. M., Penitente-Filho J. M., Torres C. A. A. Recombinant bovine somatotropin in the synchronization of ovulation in crossbred dairy cows (*Bos taurus indicus* × *Bos taurus taurus*). *Veterinary World*. 2020;13(4):746–750. DOI: <https://doi.org/10.14202/vetworld.2020.746-750>
49. Barreiro R., Lamas A., Miranda J. M., Franco C. M., Cepeda A., Regal P. Impact of Recombinant Bovine Somatotropin on Bovine Milk Composition and Fatty Acidome: A Multidose Longitudinal Study. *Foods*. 2022;11(21):3477. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11213477>

Reference

1. Beyshova I. S. Phenotypic effects of somatotropin cascade genes associated with meat productivity in Kazakh Whiteheaded cows. *Izvestiya Samarskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* = Bulletin Samara State Agricultural Academy. 2018;(1):48–53. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35019210>
2. Bordonaro S., Tumino S., Marletta D., De Angelis A., Di Paola F., Avondo M., Valenti B. Effect of GH p.L127V Polymorphism and Feeding Systems on Milk Production Traits and Fatty Acid Composition in Modicana Cows. *Animals*. 2020;10(9):1651. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani10091651>
3. Balogh O., Kovacs K., Kulcsar M., Gáspárdy A., Zsolnai A., Kátai L. et al. AluI polymorphism of the bovine growth hormone (GH) gene, resumption of ovarian cyclicity, milk production and loss of body condition at the onset of lactation in dairy cows. *Theriogenology*. 2009;71(4):553–559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2008.06.032>
4. Shevtsova A. A., Klimov E. A., Kovalchuk S. N. Review of genes variability associated with milk productivity of dairy cattle. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2018;(11-1):194–200. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36493474>
5. Tkachenko I. V., Gridina S. L. Influence of polymorphic variants of kappa-casein genes and growth hormone on dairy efficiency of ural-type heifers. *Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy. 2018;(5):87–95. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2018-5-87-95>

6. Sabetova K. D., Chaitskiy A. A., Lemyakin A. D., Shchegolev P. O. Productive traits of black and white cows with different GH and TG complex genotypes in the conditions of pedigree breeding units of the Kostroma region. *Vestnik APK Verkhnevolzh'ya* = Bulletin of the AIC of the Upper Volga. 2023;(3(63)):49–59. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35694/YARCX.2023.63.3.006>
7. Dolmatova I. Yu., Il'yasov I. G. Association of cattle growth hormone gene polymorphism with milk productivity. *Genetika* = Russian Journal of Genetics. 2011;47(6):814–820. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1022795411060081>
8. Shaydullin R. R., Zagidullin L. R., Akhmetov T. M., Khalilova G. Kh. Estimation of dairy productivity of kholmogorsky cows with allele variants of prolactin and somatotropin genes. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2022;(3):75–78. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i3pp75-78>
9. Yaluga V. L., Prozherin V. P., Khabibrakhmanova Ya. A., Kalashnikova L. A., Bagal I. E. Polymorphism of genes CSN3, LGB, PRL, GH, LEP in holmogorskaya cows. *Molochnoe i myasnoe skotovodstvo* = Journal of Dairy and Beef Cattle Farming. 2018;(4):5–8. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35325822>
10. Povochnikova M. V., Tulinova O. V., Pogorelskiy I. A., Serdyuk G. N. The genetic structure of ayrshire cattle at single nucleotide dna markers and their influence on milk production. *Genetika i razvedenie zhivotnykh* = Genetics and breeding of animals. 2015;(2):22–27. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24389576>
11. Mikhaylova M. E., Belaya E. V. Influence of polymorphic variants of somatotropin cascade genes BGH, BGHR and bIGF-1 on milk productivity traits in holstein cattle. *Doklady Natsional'noy akademii nauk Belarusi*. 2011;55(2):63–69. (In Belarus). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30053537>
12. Safina N. Yu., Gilemkhanov I. Yu., Zinnatova F. F., Shakirov Sh. K. Characteristic of milk productivity of cows-heifers with different genotypes of somatotropin (GH). *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of the Kazan State Agrarian University. 2019;14(3):58–61. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.12737/article_5db9535ed384a3.87060395
13. Perchun A. V., Lazebnaya I. V., Belokurov S. G., Ruzina M. N., Sulimova G. E. Polymorphism of CSN3, bGH and bPRL genes in connection with milk quality traits in kostroma cattle breed. *Fundamental'nye issledovaniya* = Fundamental research. 2012;(11–2):304–308. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18318436>
14. Mikhalyuk A. N., Tanana L. A., Kuz'mina T. I. Association of the complex of polymorphic variants of the DGAT1, GH, PRL and BLG, genes with dairy productivity indicators of holstein dairy cattle cows of domestic selection. *Genetika i razvedenie zhivotnykh* = Genetics and breeding of animals. 2023;(1):74–83. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31043/2410-2733-2023-1-74-83>
15. Tanana L. A., Vertinskaya O. V., Kizilevich K. O., Lebedko E. Ya. Slaughter and quality meat indicators of hereford bulls depending on the genotypes of the somatotropin gene. *Vestnik Bryanskoy GSKhA* = Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2019;(6(76)):40–44. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41466924>
16. Sedykh T. A. Association between gene polymorphism of growth hormone and growth performance of meat bulls. *Nauka i studia*. 2016;23:10–13.
17. Pal A., Chakravarty A. K. Mutations in growth hormone gene affect stability of protein structure leading to reduced growth, reproduction, and milk production in crossbred cattle—an insight. *Domestic Animal Endocrinology*. 2020;71:106405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2019.106405>
18. Nekrasov A. A., Popov A. N., Popov N. A., Fedotova E. G. Impacts of milk protein and hormone gene polymorphisms on energy for growth of holstein black-and-white heifers. *Tavricheskiy nauchnyy obozrevatel'*. 2016;(5-2(10)):91–95. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26249580>
19. Uryadnikov M. V., Ulubaev I. Kh. Assessment of somatotropin alleles and genotypes by polymorphism and live weight of black-and-white cows. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2011;(3(77)):80–83. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15615380>
20. Yaryshkin A. A., Shatalina O. S., Leshonok O. I. Associations of polymorphic variants of the somatotropin gene with economically valuable indicators of cows. *Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy. 2021;(2):60–70. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2021-2-60-70>
21. Ferchichi M. A., Jemmali B., Bel Larbi M., Ben Gara A. Genetic polymorphism of the growth hormone (GH) gene and its effect on the incidence of lameness in dairy cows in Tunisia. *Journal of new sciences*. 2021;81(2):4696–4701. URL: <https://www.jnsiences.org/agri-biotech/116-volume-81/665-genetic-polymorphism-of-the-growth-hormone-gh-gene-and-its-effect-on-the-incidence-of-lameness-in-dairy-cows-in-tunisia.html>
22. Bangar Y. C., Magotra A., Yadav A. S., Patil C. S. Meta-analysis of MspI derived variants of growth hormone gene associated with milk yield in dairy cattle. *Growth Hormone & IGF Research*. 2022;63:101459. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ghir.2022.101459>
23. Sachan S., Gupta I. D., Verma A., Vineeth M. R., Sinha R. Growth hormone-Msp1 loci polymorphism and its association with first lactation traits in Sahiwal cattle. *Indian Journal of Animal Sciences*. 2020;90(4):655–657. DOI: <https://doi.org/10.56093/ijans.v90i4.104226>

24. El-Nahas A., Basiony W. M., El-Kassas S., Mahmoud S. Variation in the Genetic Effects of ABCG2, Growth Hormone and Growth Hormone Receptor Gene Polymorphisms on Milk Production Traits in Egyptian Native, Holstein and Hybrid Cattle Populations. *Pakistan Veterinary Journal*. 2018;38(4):371–376. DOI: <https://doi.org/10.29261/pakvetj/2018.089>
25. Keogh K., Waters S. M., Kelly A. K., Wylie A. R. G., Kenny D. A. Effect of feed restriction and subsequent re-alimentation on hormones and genes of the somatotrophic axis in cattle. *Physiol Genomics*. 2015;47(7):264–273. DOI: <https://doi.org/10.1152/physiolgenomics.00134.2014>
26. Hax L. T., Schneider A., Jacometo C. B., Mattei P., Casarin da Silva T., Farina G., Corrêa M. N. Association between polymorphisms in somatotrophic axis genes and fertility of Holstein dairy cows. *Theriogenology*. 2017;88:67–72. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.03.044>
27. Lucy M. C., Verkerk G. A., Whyte B. E., Macdonald K. A., Burton L., Cursons R. T. et al. Somatotrophic axis components and nutrient partitioning in genetically diverse dairy cows managed under different feed allowances in a pasture system. *Journal of Dairy Science*. 2009;92(2):526–539. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1421>
28. Zheng W., Leng X., Vinsky M., Li C., Jiang H. Association of body weight gain with muscle, fat, and liver expression levels of growth hormone receptor, insulin-like growth factor I, and beta-adrenergic receptor mRNAs in steers. *Domestic Animal Endocrinology*. 2018;64:31–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2018.03.008>
29. Mense K., Meyerholz M., Gil Araujo M., Lietzau M., Knaack H., Wrenzycki C. The somatotrophic axis during the physiological estrus cycle in dairy heifers – Effect on hepatic expression of GHR and SOCS2. *Journal of Dairy Science*. 2015;98(4):2409–2418. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8734>
30. Yu J., Zhao L., Wang A., Eleswarapu S., Ge X., Chen D., Jiang H. Growth hormone stimulates transcription of the fibroblast growth factor 21 gene in the liver through the signal transducer and activator of transcription 5. *Endocrinology*. 2012;153(2):750–758. DOI: <https://doi.org/10.1210/en.2011-1591>
31. Khan M. Z., Khan A., Xiao J., Ma Yu., Ma J., Gao J., Gao Zh. Role of the JAK-STAT Pathway in Bovine Mastitis and Milk Production. *Animals*. 2020;10(11):2107. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani10112107>
32. Tian M., Qi Y., Zhang X., Wu Zh., Chen J., Chen F. et al. Regulation of the JAK2-STAT5 Pathway by Signaling Molecules in the Mammary Gland. *Frontiers Cell and Developmental Biology*. 2020;8:604896. DOI: <https://doi.org/10.3389/fcell.2020.604896>
33. Huang Y., Zhao F., Luo C., Zhang X., Si Yu, Sun Zh. et al. SOCS3-Mediated Blockade Reveals Major Contribution of JAK2/STAT5 Signaling Pathway to Lactation and Proliferation of Dairy Cow Mammary Epithelial Cells in Vitro. *Molecules*. 2013;18(10):12987–13002. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules181012987>
34. Arun S. J., Thomson P. C., Sheehy P. A., Khatkar M. S., Raadsma H. W., Williamson P. Targeted Analysis Reveals an Important Role of JAK-STAT-SOCS Genes for Milk Production Traits in Australian Dairy Cattle. *Frontiers in Genetics*. 2015;6:00342. DOI: <https://doi.org/10.3389/fgene.2015.00342>
35. Winkelman L. A., Lucy M. C., Elsasser T. H., Pate J. L., Reynolds C. K. Short Communication: Suppressor of Cytokine Signaling-2 mRNA Increases After Parturition in the Liver of Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*. 2008;91(3):1080–1086. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0433>
36. Kim J. W., Rhoads R. P., Block S., Overton T. R., Frank S. J., Boisclair Y. R. Dairy cows experience selective reduction of the hepatic growth hormone receptor during the periparturient period. *Journal of Endocrinology*. 2004;181(2):281–290. DOI: <https://doi.org/10.1677/joe.0.1810281>
37. Durante L. I., Angeli E., Etchevers L., Notaro U. S., Rodríguez F. M., Ortega H. H., Marelli B. E. Evaluation of the expression of growth hormone and its receptor during the resumption of postpartum ovarian follicle development in dairy cows. *Reproductive Biology*. 2024;24(1):100848. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.repbio.2023.100848>
38. Caixeta L. S., Giesy S. L., Krumm C. S., Perfield J. W., Butterfield A., Boisclair Y. R. Fibroblast growth factor-21 (FGF21) administration to early-lactating dairy cows. II. Pharmacokinetics, whole-animal performance, and lipid metabolism. *Journal of Dairy Science*. 2019;102(12):11597–11608. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2019-16696>
39. Davis A. N., Myers W. A., Chang C., Tate B. N., Rico J. E., Moniruzzaman M. et al. Somatotropin increases plasma ceramide in relation to enhanced milk yield in cows. *Domestic Animal Endocrinology*. 2021;74:106480. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2020.106480>
40. Zhao Y. Recombinant Bovine Somatotropin. Published under licence by IOP Publishing Ltd. 2020;440:022034. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/440/2/022034>
41. Jarvis L. S. The Potential Effect Of Two New Biotechnologies On The World Dairy Industry. Boca Raton: CRC Press, 1996. p. 168. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429314032>
42. St-Pierre N. R., Milliken G. A., Bauman D. E., Collier R. J., Hogan J. S., Shearer J. K. et al. Meta-analysis of the effects of sometribove zinc suspension on the production and health of lactating dairy cows. *Journal of the American Veterinary Medical Association*. 2014;245(5):550–564. DOI: <https://doi.org/10.2460/javma.245.5.550>
43. Silva P. R.B., Weber W. J., Crooker B. A., Collier R. J., Thatcher W. W., Chebel R. C. Hepatic mRNA expression for genes related to somatotrophic axis, glucose and lipid metabolisms, and inflammatory response of periparturient dairy cows treated with recombinant bovine somatotropin. *Journal of Dairy Science*. 2017;100(5):3983–3999. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12135>

44. Silva P. R. B., Machado K. S., Lobao Da Silva D. N., Moraes J. G. N., Keisler D. H., Chebel R. C. Effects of recombinant bovine somatotropin during the periparturient period on innate and adaptive immune responses, systemic inflammation, and metabolism of dairy cows. *Journal of Dairy Science*. 2015;98(7):4449–4464.

DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2014-8959>

45. Baruselli P. S., Elliff F. M., Silva L. G., Catussi B. L. Ch., Bayeux B. M. Estrategias para aumentar a producao de embrioes em bovinos. *Revista Brasileira de Reproducao Animal*. 2019;43(2):315–326.

URL: <https://repositorio.usp.br/item/002956228>

46. Campos B. G., Lombardi M. C., Neto H. C. D., Lana A. M. Q., Pereira M. N., Rabelo E. et al. How to use recombinant bovine somatotropin in crossbred Holstein x Gyr (¾ and 7/8) cows? *Tropical Animal Health and Production*. 2022;1–11. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1702713/v1>

47. Gasseferth G., Gaievski F. R., Bergstein-Galan T. G., Junior A. G., Bragato A., Valle V. M. et al. Effect of recombinant bovine somatotropin on the reproductive efficiency of beef cows subjected to differently timed-artificial insemination protocols. *Reproduction in Domestic Animals*. 2023;58(12):1654–1661.

DOI: <https://doi.org/10.1111/rda.14479>

48. Oliveira F. A., Almeida I. C., Sena L. M., Penitente-Filho J. M., Torres C. A. A. Recombinant bovine somatotropin in the synchronization of ovulation in crossbred dairy cows (*Bos taurus indicus* × *Bos taurus taurus*). *Veterinary World*. 2020;13(4):746–750. DOI: <https://doi.org/10.14202/vetworld.2020.746-750>

49. Barreiro R., Lamas A., Miranda J. M., Franco C. M., Cepeda A., Regal P. Impact of Recombinant Bovine Somatotropin on Bovine Milk Composition and Fatty Acidome: A Multidose Longitudinal Study. *Foods*. 2022;11(21):3477. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11213477>

Сведения об авторах

✉ **Кожевникова Ирина Сергеевна**, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник, ФГБНУ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, проспект Никольский, 20, г. Архангельск, Российская Федерация, 163000, e-mail: labinnovrazv@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7194-9465>

Ступина Александра Олеговна, младший научный сотрудник, ФГБНУ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, проспект Никольский, 20, г. Архангельск, Российская Федерация, 163000, e-mail: labinnovrazv@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7664-3684>

Классен Инга Андреевна, младший научный сотрудник, ФГБНУ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, проспект Никольский, 20, г. Архангельск, Российская Федерация, 163000, e-mail: labinnovrazv@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4421-6087>

Information about the authors

✉ **Irina S. Kozhevnikova**, PhD in Biology, senior researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Nikolsky Prospekt, 20, Archangelsk, Russian Federation, 163000, e-mail: labinnovrazv@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7194-9465>

Alexsandra O. Stupina, junior researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Nikolsky Prospekt, 20, Archangelsk, Russian Federation, 163000, e-mail: labinnovrazv@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7664-3684>

Inga A. Klassen, junior researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Nikolsky Prospekt, 20, Archangelsk, Russian Federation, 163000, e-mail: labinnovrazv@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7664-3684>

✉ – Для контактов / Corresponding author

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.725-736>
УДК 636.085.66:636.4



Аспекты биологической безопасности производства кормов для свиней (обзор)

© 2025. О. А. Бурова✉, Е. А. Широкова, Т. В. Овсяхно, Т. Н. Демидова, И. В. Яшин, А. А. Блохин

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», Нижегородский научно-исследовательский ветеринарный институт – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Обеспечение продовольственной безопасности, в частности, производство свинины, в значительной степени определяет необходимость усиления биобезопасности на животноводческих комплексах и контроля путей распространения инфекционных болезней. Корма и ингредиенты первоначально не считались существенными факторами в распространении инфекций, но недавние вспышки болезней свиней продемонстрировали их роль в заносе и распространении возбудителей. Цель данного обзора – рассмотреть потенциальную роль кормов для свиней как значимое звено в цепи переноса возбудителей и описать меры биобезопасности, способствующие обеспечению эпизоотического благополучия популяций свиней. Описаны потенциальные методы предотвращения заражения свиней патогенами из кормов, включая предотвращение попадания в кормовую систему, смягчение последствий путем термической обработки или обеззараживания химическими реагентами. Предложены стратегии, позволяющие снизить риск распространения патогенов в среде производства кормов, включая потенциальный перенос от партии к партии, что позволяет снизить риск передачи инфекции.

Ключевые слова: кормопроизводство, патогены, вирусы, обеззараживание

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии» (тема № FGNM-2025-0001).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Бурова О. А., Широкова Е. А., Овсяхно Т. В., Демидова Т. Н., Яшин И. В., Блохин А. А. Аспекты биологической безопасности производства кормов для свиней (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2025;26(4):725–736. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.725-736>

Поступила: 26.02.2025

Принята к публикации: 01.08.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

Aspects of biosecurity of pig feed production (review)

© 2025. Olga A. Burova✉, Ekaterina A. Shirokova, Tatiana V. Ovsyukhno, Tatiana N. Demidova, Ivan V. Yashin, Andrey A. Blokhin

Federal Research Center for Virology and Microbiology, Nizhny Novgorod Research Veterinary Institute – Branch of Federal Research Center for Virology and Microbiology, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Food security, particularly pork production, is largely driven by the need to enhance on-farm biosecurity and control the pathways of infectious diseases. Feed and ingredients were not initially considered significant factors in the spread of infections, but recent outbreaks of swine diseases have demonstrated their role in the introduction and spread of pathogens. The purpose of this review is to consider the potential role of swine feed as a significant link in the pathogen transfer chain and to describe biosecurity measures that contribute to the epizootic welfare of swine populations. Potential methods for preventing pathogen contamination of pigs from feed are described, including prevention of entry into the feed system, mitigation of after-effects by heat treatment, or decontamination with chemicals. Strategies are proposed to reduce the risk of pathogen spread in the feed production environment, including potential batch-to-batch transfer, thereby reducing the risk of infection transmission.

Keywords: feed production, pathogens, viruses, disinfection

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 Center for Virology and Microbiology (theme № FGNM-2025-0001).

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: Burova O. A., Shirokova E. A., Ovsyukhno T. V., Demidova T. N., Yashin I. V., Blokhin A. A. Aspects of biosecurity of pig feed production (review). *Agrarnaya nauka Euro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):725–736. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.725-736>

Received: 26.02.2025

Accepted for publication: 01.08.2025

Published online: 29.08.2025

На уровне животноводческих хозяйств биобезопасности придается большое значение, но только недавно на нее стали обращать внимание в процессе производства кормов. Накоплены факты, свидетельствующие о способности кормов и кормовых ингредиентов сохранять жизнеспособность вирусов и выживаемость бактерий, что указывает на то, что корма и ингредиенты могут быть источниками патогенов.

Возбудителями инфекционных болезней свиней, которые могут содержаться в кормах, являются бактерии, такие как сальмонелла (*Salmonella* spp.), кишечная палочка (*Escherichia coli*), и вирусы, такие как вирус эпидемической диареи свиней (PEDV), вирус африканской чумы свиней (ASFV), вирус болезни долины Сенека (SVA), вирус классической чумы свиней (CSFV), вирус болезни Ауески (PRV) и вирус ящура (FMD). Данные патогены различаются по молекулярной структуре (наличие капсулы, суперкапсида и т. п.), устойчивости в окружающей среде, чувствительности к дезинфектантам и технологическим параметрам кормопроизводства, поэтому контаминация ими кормов может иметь разную степень. Любые загрязнения (например, фекальные) могут привести к попаданию этих патогенов в кормовые ингредиенты, а тип корма и способ загрязнения могут повлиять на их сохранность в корме и вирулентность для свиней. Недавние исследования показали, что такие патогены, как вирус эпидемической диареи свиней и вирус африканской чумы свиней, могут оставаться жизнеспособными в условиях трансграничных перевозок в соевом шроте, лизине и полнорационных кормах, а зараженные корма могут вызывать заболевания животных [1]. В целом, внимание к биобезопасности кормов, уделяемое в последние годы, оправдано, поскольку является ключевым инструментом обеспечения биологической безопасности животноводства, однако необходимы дополнительные исследования для более глубокого понимания риска контаминации кормов патогенами для разработки экономически эффективных подходов к поддержанию биобезопасности кормов как способа защиты здоровья свиней.

Цель работы – оценка потенциальной роли кормов для свиней как источника возбудителей болезней и описание мер биобезопасности, способствующих обеспечению эпизоотического благополучия популяций свиней.

Материал и методы. Поиск источников проводили путем скрининга международных баз научного цитирования Web of Science, Scopus, Mendeley и базы Российского индекса научного цитирования. Критериями служили ключевые слова: кормопроизводство (feed production), свиньи (pigs), патогены (pathogens), биобезопасность (biosecurity). После исключения повторяющихся, непроверенных данных и выбора публикаций, полностью соответствующих цели работы, было отобрано 47 источников.

Основная часть. Патогенные бактерии в кормах и кормовых ингредиентах. При контаминации кормов патогенными и условно-патогенными микроорганизмами безопасность их скармливания животным зависит от количества этих микроорганизмов и степени выживаемости в кормовой среде. Наиболее часто из кормов изолируют патогенные микроорганизмы – рода сальмонелла (*Salmonella*) и рода эшерихия (*Escherichia*), из условно-патогенных – стафилококки (*Staphylococcus*), энтеробактерии (*Enterobacter*, *Klebsiella*, *Proteus*, *Shigella*, *Citrobacter* и др.) и синегнойную палочку (*Pseudomonas aeruginosa*) [2].

Из потенциальных патогенных микроорганизмов, обнаруживаемых в кормах, наиболее изученными являются сальмонеллы (*Salmonella* spp.) [3]. Коммерческие корма имеют большое значение в качестве потенциального средства передачи сальмонелл. Обнаружено, что 3,6 % проб корма и 17,2 % проб фекалий были положительными на *S. enterica* subsp. *enterica* в 36 свинарниках, где содержалось более 6500 свиней. Более половины изолятов сальмонелл были генотипически связаны с аналогичными фенотипами и моделями устойчивости к антимикробным препаратам [4].

Одним из новых серотипов, вызывающих опасения при производстве кормов для свиней, является *S. enterica* серотип 4,5,12:i:-, монофазный вариант *S. typhimurium*. В связи с устойчивостью к множеству лекарственных препаратов и распространенностью на комбикормовых заводах, этот серотип необходимо контролировать в рамках мониторинга биобезопасности кормов. В 2012 году он был шестым по распространенности серотипом, обнаруженным в кормах для животных, и седьмым – при инфекциях человека [5]. Данный серотип стал причиной вспышек сальмонеллеза в США и Китае, а также оказался устойчивым ко многим распространенным антимикробным

препаратам [6, 7]. В ходе другого исследования на 11 комбикормовых заводах в США *S. enterica* серотип 4,5,12:i:- был обнаружен в производственной среде двух разных заводов [8]. Результаты исследования наличия энтеробактерий и сальмонелл на 11 комбикормовых заводах показаны на рисунке 1. Наиболее загрязнены были бункер и решетка для ингредиентов, напольная пыль в зоне приема ингредиентов и рабочая обувь [8].

Присутствие других патогенных бактерий в кормах для свиней менее распространено.

Например, 17 из 24 образцов корма для свинематок, собранных в центральном Таиланде [9], были положительными на *E. coli*, но только один образец содержал >100 колониеобразующих единиц (КОЕ) в 1 мл. В другом исследовании [10] 2 из 24 образцов корма для свиней, собранных в США, содержали *E. coli*, причем оба образца были получены из штата Вашингтон. Исследование 11 комбикормовых заводов США, описанное выше, также выявило *E. coli* в одном образце готового корма для свиней [8].

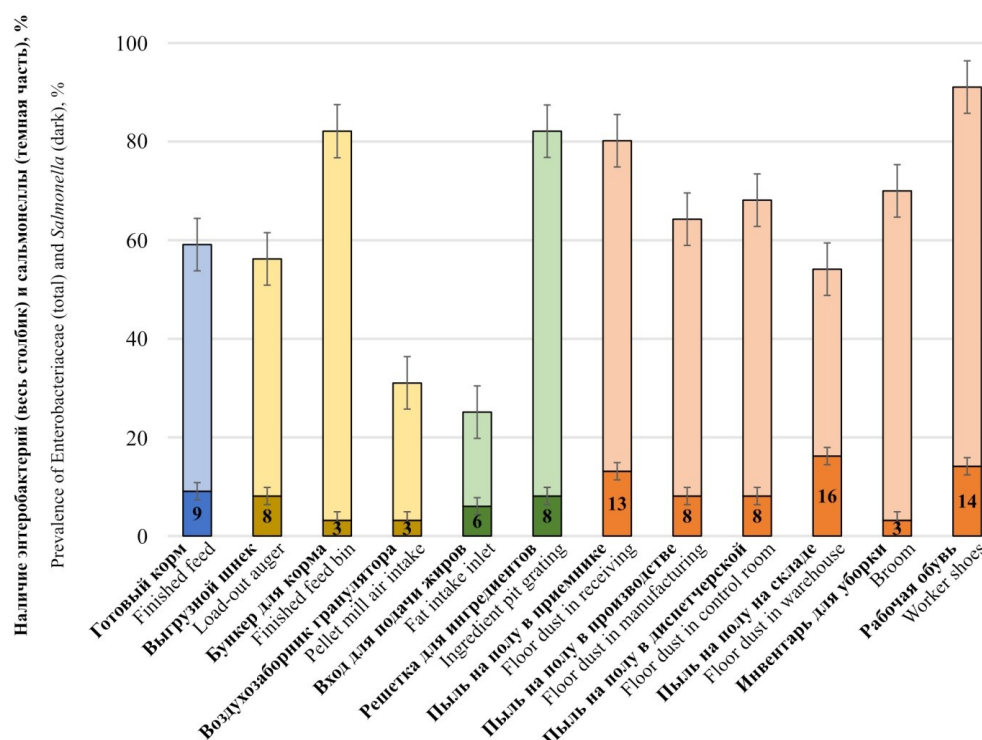


Рис. 1. Наличие энтеробактерий на 11 комбикормовых заводах США [8]. Уровни содержания энтеробактерий (общие столбики) варьируют в зависимости от места исследования, но ассоциируются с присутствием *Salmonella* spp. (темная часть столбиков) /

Fig. 1. The presence of Enterobacteriaceae at 11 feed mills in the United States [8]. Enterobacteriaceae levels (total bars) vary by site but are associated with the presence of *Salmonella* spp. (dark part of bars)

Сальмонелла и кишечная палочка относятся к семейству *Enterobacteriaceae*. Контроль содержания бактерий данного семейства в кормах может служить индикатором соблюдения правил биобезопасности и даже предсказывать будущие вспышки заболеваний [8]. Кроме того, энтеробактерии обычно используются для индикации соблюдения правил гигиены и биобезопасности на предприятиях по производству продуктов питания, продуктов переработки и кормов [11, 12, 13]. Активный мониторинг энтеробактерий следует рассматривать как метод более эффективного их

выявления и контроля степени биобезопасности на технологических этапах производства кормов с наибольшим риском их контаминации патогенами.

Вирусы в кормах и кормовых ингредиентах. Исследования показали, что вирусы, такие как вирус эпидемической диареи свиней, африканской чумы свиней, болезни долины Сенека, классической чумы свиней, болезни Ауески и ящура могут длительное время сохраняться в кормах и кормовых ингредиентах (соевой муке, витамине D, гидрохлориде лизина и хлориде холина), что обеспечивает

им трансграничный потенциал [14, 15]. Устойчивость патогена определяется его молекулярно-генетическими свойствами, а также физико-химическими свойствами кормовых ингредиентов и готовых кормов. Различные кормовые ингредиенты могут не только обеспечивать сохранность вирусов, но и повышать её. Например, обычная соевая мука обеспечивает более высокий уровень сохранности вирусов по сравнению с органической соевой мукой, которая получается из зерна, выращенного без использования пестицидов и перемолотого без отбеливания и химического созревания. Точная причина такой разницы в выживаемости патогенов в разных видах соевой муки неизвестна, но она может быть связана с более высоким содержанием жиров в органическом сорте, поскольку есть доказательства того, что смеси среднецепочечных жирных кислот (СЦЖК) обладают вирулицидным действием [16]. Также была выдвинута гипотеза о том, что ингредиенты с высоким содержанием белка обладают большей способностью сохранять инфекционность вирусов, однако механизм этого пока не изучен. В целом кормовые ингредиенты имеют высокий риск переноса вирусных патогенов [14].

Вирулентность патогенов в кормах для свиней и их ингредиентах. Для того чтобы вызвать инфекцию у здоровых животных, необходима достаточная инфицирующая доза патогена. При этом вирулентность часто зависит от того, насколько интактны вирусные капсиды или липидные мембраны бактерий, поскольку они защищают патоген от разрушения во время хранения и транспортировки. Например, минимальная инфицирующая доза *S. typhimurium* для свиней составляет $>10^3$ КОЕ на 1 г корма [17], *E. coli* – 6×10^3 КОЕ на 1 г корма [18].

В настоящее время весьма актуальны исследования, направленные на определение средней инфицирующей дозы вируса африканской чумы свиней как в кормах, так и в воде [19]. Для определения минимальной или средней инфицирующей дозы для ряда бактерий и вирусов, включая энтеротоксигенную кишечную палочку, SVA, CSFV и PRV, нужны дополнительные исследования, результаты которых станут определяющими при разработке технологий по снижению и контролю содержания патогенов в кормах. Хотя в норме патогены в кормах или ингредиентах обнаруживаться не должны, для поддержания здоровья животных необходимо, по крайней мере, предотвратить

или снизить их возможное присутствие до уровня ниже инфицирующей дозы.

После выявления биологических рисков, необходимо разрабатывать технологии, предотвращающие проникновение патогенов на производство кормов, а также меры по снижению контаминации в случае, если проникновение предотвратить нельзя. Возможны разные варианты биозащиты предприятий по производству кормов, которые могут послужить основой для разработки плана биозащиты конкретного завода [20, 21]. Некоторые из этих рекомендаций приведены ниже.

План биозащиты производства кормов для свиней. Наиболее эффективным компонентом плана биобезопасности комбикормового завода является предотвращение проникновения патогенов. Главный стимул для полного предотвращения проникновения патогенов на предприятие заключается в том, что попадание загрязненного сырья на комбикормовый завод может привести к его загрязнению на длительный период времени [22]. Контроль за проникновением патогенов на предприятие должен начинаться с оценки поставщиков ингредиентов. Разработка программы проверки поставщиков, включающей конкретные требования к закупаемым ингредиентам, а также доведение требований безопасности до сведения поставщика является важным шагом в предотвращении проникновения патогенов. Сюда можно включить проверку протоколов производства ингредиентов и производственных объектов на месте. Как уже упоминалось ранее, некоторые ингредиенты способны поддерживать жизнеспособность и патогенность бактерий и вирусов в большей степени, чем другие. Таким образом, лучший способ предотвратить заражение животных – это исключить из рецептур рациона ингредиенты с высоким риском контаминации патогенами. Скоординированные усилия потребителей, составителей рецептур, закупщиков и поставщиков кормов имеют важное значение для поддержания эффективного плана биобезопасности комбикормового завода и свиноводческой отрасли в целом.

Хотя наличие программы контроля поставщиков является важным шагом в борьбе с проникновением патогенов на предприятие, регулярный отбор проб и анализ ингредиентов, которые считаются высокорисковыми в отношении определенных патогенов, является ценным инструментом. Все отборы проб должны

проводиться асептическим методом, так как необходимо предотвратить перекрестную контаминацию проб в процессе отбора. Если ингредиент относится к категории высокого риска, каждую партию необходимо проанализировать отдельно, если риск ниже, целесообразнее собранные образцы объединить в одну пробу, чтобы снизить затраты на исследования. Определение и составление графика отбора проб ингредиентов, относящихся к категории повышенного риска, а также определение процедуры хранения запасов до получения результатов анализа помогут снизить вероятность попадания патогенов на предприятие. Контроль ингредиентов имеет большое значение, и ведение записей, в которых указывается такая информация, как дата и время приема, номер партии при разгрузке, а также данные о предыдущих перевозках, связанные с конкретными партиями готового корма, позволяет быстро реагировать при подозрении на заражение.

Перемещения людей и транспортных средств на территории предприятия по производству комбикормов или за его пределы также могут привести к заносу патогенов. Люди переносят частицы фекалий, грязи или пыли, контаминированные патогенными микроорганизмами, на подошвах своей обуви или одежде. Риск переноса патогенов особенно высок, если они приходят с другой фермы или комбикормового завода, где уже произошел занос возбудителей болезней свиней.

Контроль и минимизация перемещения персонала в зоне разгрузки кормовых ингредиентов – логичный и недорогой метод снижения риска попадания биологических патогенов в производственный цикл. На комбикормовых заводах с повышенным риском заноса биологических патогенов в планы биобезопасности целесообразно внедрить программы гигиенического зонирования. Требование, чтобы всех посетителей на предприятии постоянно сопровождал обученный сотрудник, может помочь предотвратить нарушения биобезопасности. Посетителям должна выдаваться чистая обувь или чехлы для обуви, чтобы ограничить проникновение внешних загрязнителей. Это касается и водителей прибывающих грузовиков. В идеале водители должны постоянно находиться в своих грузовиках, чтобы свести к минимуму любое передвижение, особенно в зоне приемки и разгрузки.

Грузовики, въезжающие на комбикормовый завод, должны быть очищены от грязи до того, как автомобиль попадет в зону приемки и разгрузки, приемный бункер должен оставаться закрытым до тех пор, пока грузовик не будет готов к разгрузке. Ингредиенты могли быть загрязнены до разгрузки, но они также могут быть загрязнены в процессе разгрузки из-за грязи или мусора с пола, смешивающихся с ингредиентами в точке выгрузки. Контроль за закрытым состоянием приемного бункера во время движения грузовиков снижает риск загрязнения во время разгрузки. Использование конусов и воронкообразных устройств также позволяет ограничить количество материала, просыпающегося во время разгрузки, и предотвратить сметание просыпанных ингредиентов в приемный бункер работниками завода.

Попавшие на пол в процессе разгрузки частицы кормовых ингредиентов считаются отходами и должны утилизироваться вместе с пылью и мусором с пола. На многих предприятиях по производству кормов установлены зерноочистители и оборудование для сбора пыли, хотя доказано, что пыль и другие просеянные частицы могут служить переносчиками патогенов, в том числе вирусов [23] или микотоксинов [24]. Многие производители кормов считают, что добавление пыли или просеянного материала в готовый корм допустимо, поскольку это уменьшит усадку ингредиентов. Однако затраты, связанные со снижением продуктивности животных и/или увеличением смертности, гораздо выше, чем потеря эффективности комбикормового завода, поэтому вся пыль и отсеянные частицы должны всегда утилизироваться, а не добавляться обратно в корм.

Повышение биобезопасности кормов и ингредиентов для свиней. Как только патоген проникает на предприятие, его распространение практически невозможно контролировать, поскольку большинство предприятий по производству кормов изначально не были спроектированы с учетом требований биологической безопасности. Кроме того, стратегии снижения риска контаминации кормов, которые возможны в одних системах, не работают в других из-за различий в конструкции и оборудовании, производственных операциях и других сопутствующих факторах риска на разных комбикормовых заводах. Тип поверхности (бетон, пластик, резина, нержавеющая сталь и т. д.) по-разному влияет на выживаемость патогенов при различных процедурах дезинфекции [25].

Поверхности из нержавеющей стали и гладкого пластика, хотя и легче чистить, чем шины, резиновые ремни или полиэтиленовые контейнеры, но сложнее дезинфицировать из-за образования биопленок, которые защищают бактерии и вирусы от химического воздействия. Поэтому часто необходимо проводить как очистку, так и дезинфекцию, что практически невозможно при существующих ограничениях конструкции оборудования.

Распространение патогенов через перекрестную контаминацию сложно предотвратить из-за высококонтагиозной природы загрязненной пыли и непрактичности механической уборки на большинстве заводов. Об этом говорят результаты исследования [26] роли перекрестной контаминации кормов PEDV на комбикормовых заводах. На экспериментальном оборудовании для производства кормов смешивали и транспортировали кормовую смесь для поросят-отъемышей на основе кукурузной и соевой муки, заведомо отрицательную по PEDV.

Затем подавали кормовую смесь, включающую ингредиент, который был контаминирован инфекционным PEDV, а за ней четыре последующие партии, не содержащие вирус (рис. 2). После каждой партии в асептических условиях отбирали смывы с разных поверхностей – непосредственно контактирующих с кормом (контактные поверхности прямой подачи), находящихся на расстоянии до 1 м (соседние поверхности) и от 1 до 2 м (другие поверхности). По результатам исследований разных поверхностей при подаче нескольких партий корма, существенных различий не наблюдали, однако, количество обнаруживаемого вируса постепенно уменьшалось на поверхностях, непосредственно контактирующих с кормом, как бы «смываясь» чистыми партиями корма. После механической очистки количество ДНК-вируса на всех поверхностях снизилось на 40–60 %, только после дезинфекции стало отрицательным, сохраняясь и после опыта.

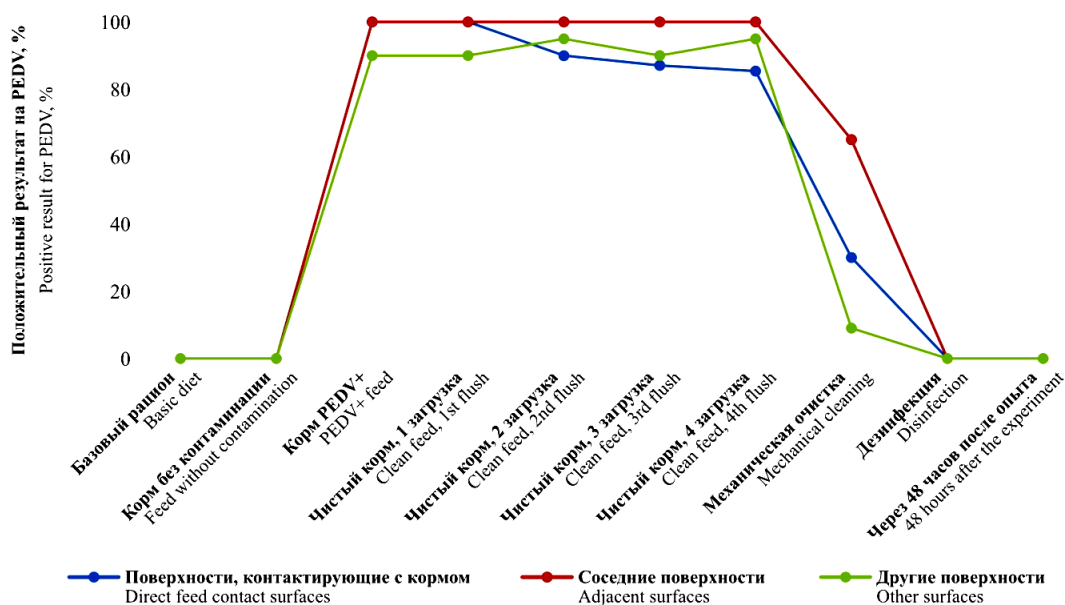


Рис. 2. Роль перекрестной контаминации PEDV на комбикормовых заводах [26] /
Fig. 2. The role of PEDV cross-contamination in feed mills [26]

Опытным путем (в биопробе со свиньями) доказано, что пыль, собранная с поверхностей для производства кормов, может вызывать инфекцию у свиней [27]. Поэтому ограничение и контроль образования и скапливания пыли, образующейся в процессе производства, должны быть приоритетными, поскольку это может служить фактором распространения инфекции при передаче вирусных заболеваний, таких как PEDV. Кроме того, необходимо разработать

протоколы промывки ингредиентов, чтобы свести к минимуму риск образования пыли. На модели PEDV было доказано [23], что промывка рисовой шелухи является экономически эффективной стратегией для снижения риска перекрестной контаминации.

Для РНК-вирусов методы снижения риска зависят, в частности, от разрушения вирусного капсида, который удаляет защитную оболочку вокруг вируса [28]. Известны

три основные категории стратегий по снижению воздействия, включающие биологические, физические и химические. Биологическая инактивация обычно происходит с использованием специфических ферментов или других продуктов микробного происхождения, которые атакуют вирусы или бактерии [29], однако исследований, позволяющих определить, подходит ли такая стратегия снижения контаминации кормов для отрасли производства кормов, не хватает. Физическая инактивация при производстве кормов чаще всего достигается путем термической обработки, но ее следует рассматривать как стратегию снижения риска в определенный момент времени, поскольку она не предотвращает риск заражения после обработки. Использование химических агентов, таких как формальдегид или среднецепочечные жирные кислоты в качестве кормовых добавок показало, что они обладают отличным потенциалом для ингибирования вирусов и бактерий в кормах. Преимущество этих химических агентов заключается в том, что они обладают как немедленной, так и остаточной эффективностью, что может помочь в снижении контаминации кормов с момента применения до момента употребления корма. Ниже рассматриваются конкретные исследования, определяющие стратегии снижения контаминации кормов, которые могут быть использованы в процессе производства кормов.

Так как PEDV – это термочувствительный вирус, то зависимость «температура – время» может использоваться для разработки способа инактивации PEDV [30]. Поэтому были проведены два исследования теплового воздействия при прохождении корма через мельницу для производства кормовых гранул [31]. В первом исследовании использовали разные дозы PEDV для загрязнения корма, затем полученный корм обрабатывали одной из девяти комбинаций с разными температурой гранулирования (68, 79 или 90 °C) и временем выдерживания в грануляторе (45, 90 или 180 секунд). Все обработанные партии корма не смогли вызвать инфекцию у свиней, хотя необработанный корм приводил к заражению PEDV. В последующем испытании те же исследователи [31] обработали корм в грануляторе, используя время выдерживания 30 секунд и одну из пяти температур (38, 46, 54, 63 или 71 °C), и заметили, что корм, обработанный при температуре 54 °C или выше, смог предотвратить

заражение PEDV, в то время как корм, обработанный при двух низких температурах, привел к заражению. Эта серия испытаний продемонстрировала, что термическое воздействие является возможным средством минимизации риска, связанного с передачей вирусов, и, что более важно, показала, что оборудование, обычно используемое на коммерческих комбикормовых заводах, эффективно для применения термического воздействия. Однако важно помнить, что гранулятор хоть и обеспечивает обеззараживание корма в момент обработки, но это не предотвращает риск повторной контаминации готового корма.

Использование химических кормовых добавок в качестве стратегии снижения биологической опасности кормов привлекательно тем, что они обеспечивают эффективность на всех этапах цепочки производства и поставок кормов, а также способны влиять на продуктивность животных после их употребления. Было протестировано множество различных продуктов в качестве химических средств повышения биобезопасности кормов. Некоторые соединения, показавшие определенную эффективность в снижении или устранении вирусного или бактериального риска, включают органические кислоты [32], эфирные масла [33], бисульфат или хлорат натрия [34]; однако совокупные данные свидетельствуют о том, что эффективность любого химического средства для снижения содержания патогенов в кормах зависит не только от цели, но и от ингредиента корма [35]. Из всех доступных потенциальных кормовых антисептиков наибольший коммерческий интерес представляют формальдегид и СЦЖК.

Было доказано, что формальдегид эффективно предотвращает риск, связанный с загрязнением кормов вирусами [35, 36, 37], а также сальмонеллами [20, 21]. Однако для точного дозирования формальдегида необходимо использовать специализированное оборудование, а также есть риск здоровью работников, негативного отношения некоторых потребителей, что может привести к ограничению коммерческого применения формальдегида. Кроме того, использование формальдегида в кормах может привести к дисбиозу в кишечнике свиней и снижению их продуктивности [38].

Использование СЦЖК в качестве химических средств для снижения содержания патогенов в кормах было эффективно против

PEDV [35] и сальмонеллы [20, 21]. В серии опытов доказано, что комбинации капроновой, каприловой и каприновой кислот являются наиболее эффективными, а лауриновая кислота малоэффективна против PEDV. Интересно, что увеличение концентрации смеси капроновой, каприловой и каприновой кислот в соотношении 1:1:1 также привело к линейному увеличению показателей роста, а добавление 1,5 % от массы корма привело к приросту до 2 кг массы тела по сравнению с рационом без СЦЖК при кормлении свиней в течение 35 дней [39]. Более того, корм, проверенный через 40 дней после применения СЦЖК, все еще успешно снижал риск заражения PEDV, что демонстрирует остаточный потенциал СЦЖК для снижения контаминации кормов.

Решение проблемы биологического загрязнения комбикормовых заводов. Из-за большого количества взвешенных частиц в воздухе на предприятиях по производству кормов для животных загрязнение пылью является основным механизмом контаминации кормов и оборудования возбудителями инфекционных болезней. Это усугубляется сложностями, связанными с физической очисткой [25]. Для полной деконтаминации производственных поверхностей необходимо использование жидких химических дезинфицирующих средств и термообработки [40]. Это помогает удалять биопленку, что позволяет дезинфицирующему средству проникнуть к поверхности и удалить патогены. Оба этапа необходимы, но могут оказаться сложными во многих системах производства кормов из-за отсутствия доступа или возможности тщательно очистить или безопасно продезинфицировать системы производства сухих сыпучих продуктов. Не следует упускать из виду и очистку поверхностей, не соприкасающихся с кормами и ингредиентами, поскольку биологические агенты могут эффективно распространяться по предприятию через пыль и другие частицы, находящиеся в воздухе. Эти загрязнения не устраняются в процессе промывки и могут привести к загрязнению последующих партий корма [26].

Поскольку полная физическая очистка систем производства кормов может оказаться затруднительной, для снижения уровня патогенов на контактирующих с кормом поверхностях можно использовать процедуры промывки с добавлением таких веществ, как формальдегид, СЦЖК и сухие смеси эфирных масел.

Данные свидетельствуют о том, что риск биологической опасности может быть снижен после третьей промывки или после использования химической дезинфекции [23, 25, 26]. Доказано, что продукты на основе формальдегида и смесь СЦЖК снижают присутствие PEDV на разных поверхностях при использовании рисовой шелухи в сочетании с промывкой. Аналогичным образом было установлено, что смеси СЦЖК эффективно снижают количество *S. enterica serovar typhimurium* на поверхностях из нержавеющей стали, а также уменьшают количество загрязнений *S. enterica serovar typhimurium* после обработки, если содержание их в корме для свиней было в количестве не менее 2 % до его контаминации бактериями [20].

Перспективные направления развития биобезопасности кормопроизводства. Очевидно, что необходимы дополнительные исследования, чтобы лучше понять как риск, так и меры предупреждения контаминации патогенами кормов для свиней. Исследования по сохранности и снижению содержания патогенов в кормах, нивелированию последствий их попадания в кормовые ингредиенты и стратегиям обеззараживания должны быть продолжены в будущем. Необходимы дополнительные исследования для оценки роли полезных бактерий в конкурентном исключении патогенов в условиях производства кормов, как это предложено для борьбы с листериями на птицефабриках [41] или с сальмонеллой и другими патогенными бактериями на мясоперерабатывающих предприятиях [42, 43, 44]. Кроме того, в будущем важно понять, как обеспечить исполнение требований биологической безопасности при модернизации и новом строительстве комбикормовых заводов.

Одним из факторов, ограничивающих возможность более быстрого прогресса в области безопасности кормопроизводства, является то, что лишь немногие методы молекулярной диагностики были должным образом валидированы для кормов. Снижение и потеря диагностической чувствительности к вирусной РНК, по-видимому, не связана с дозой, поскольку при внесении в корм разного количества PEDV обнаруживали схожую картину [45]. Позже это было подтверждено в других работах, где сообщается о последовательном снижении выявляемости PEDV, PRRSV, ASFV и SVA при инокуляции корма разными дозами [14,

31, 46]. Потеря диагностической чувствительности, по-видимому, варьирует от одного корма или ингредиента к другому [15, 21]. Такое снижение чувствительности представляет собой проблему для ветеринарных диагностических лабораторий и имеет существенные последствия: оно приводит к ложноотрицательным результатам и, как следствие, признанию контаминированного патогенами корма биологически безопасным [47].

В настоящее время существующие методы пробоподготовки, экстракции и обнаружения нуклеиновых кислот в кормах слишком разнообразны и не унифицированы, поэтому они имеют высокий риск ложноотрицательного результата, что сводит на нет ценность теста. Необходимы исследования для проверки методов молекулярного обнаружения патогенов в кормах, которые затем могут быть использованы для создания соответствующего метода отбора проб и диагностических устройств для точечного использования.

В заключении мы предлагаем рекомендации по обеспечению максимальной биобезопасности производства кормов для свиней.

1. Корма являются источниками возбудителей особо опасных болезней животных, в том числе вирусных болезней свиней. При этом с одной стороны, технология их производства является фактором риска их контаминации микроорганизмами, а с другой – позволяет эффективно их обезвреживать.

2. Способы обеспечения биобезопасности, применяемые на конкретном предприятии, могут отличаться от процедур, применяемых на других предприятиях, в части допустимого риска контаминации и цены применяемых стратегий снижения данного риска.

3. Разработка технологических протоколов предотвращения проникновения патогенов на завод предусматривает выявление и устранение ингредиентов высокого риска контаминации кормов и сохранения в них возбудителей болезней, минимизацию перемещений людей и оборудования, закрытие всех открытых точек входа, когда они не используются.

4. Применение стратегий снижения риска контаминации кормов не предотвращает на 100 % занос патогенов на комбикормовые заводы, поэтому необходимо использовать стратегии снижения данного риска. Наилучшим вариантом является определение стратегий, которые эффективны в отношении конкретных опасных факторов, и использование комбинации мероприятий по снижению риска, а также средств, обладающих остаточной эффективностью, для обеспечения защиты на протяжении всего технологического цикла производства и поставки кормов. Например, сбор и удаление пыли не только создают более безопасные и благоприятные условия для работников, но и устраняют основные очаги контаминации.

5. Обеззараживание комбикормового завода должно сочетать физическую очистку, химическую дезинфекцию и применение высокой температуры при производстве кормов.

References

1. Stewart S. C., Dritz S. S., Woodworth J. C., Paulk C., Jones C. K. A review of strategies to impact swine feed biosecurity. *Animal Health Research Reviews*. 2020;21(1):61–68. DOI: <https://doi.org/10.1017/S146625231900015X>
2. Гранкина А. С., Голякевич З. С. Бактериальная обсемененность кормов животного и растительного происхождения, используемых в животноводстве. *Биотика*. 2015;(6(7)):133–141. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26591290> EDN: WJXIHf
3. Grankina A. S., Golyakevich Z. S. Bacterial contamination of animal and plant feed used in animal husbandry. *Biotika*. 2015;(6(7)):133–141. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26591290>
4. Österberg J., Vågsholm I., Boqvist S., Sternberg Lewerin S. Feed-borne outbreak of *Salmonella* Cubana in Swedish pig farms: risk factors and factors affecting the restriction period in infected farms. *Acta Veterinaria Scandinavica*. 2006;47(1):13–21. DOI: <https://doi.org/10.1186/1751-0147-47-13>
5. Molla B., Serman A., Mathews J., Artuso-Ponte V., Abley M., Farmer W. et al. *Salmonella enterica* in commercial swine feed and subsequent isolation of phenotypically and genotypically related strains from fecal samples. *Applied Environmental Microbiology*. 2010;76(21):7188–7193. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.01169-10>
6. Li X., Bethune L. A., Jia Y., Lovell R. A., Proescholdt T. A., Benz S. A. et al. Surveillance of *Salmonella* prevalence in animal feeds and characterization of the *Salmonella* isolates by serotyping and antimicrobial susceptibility. *Foodborne Pathogens and Disease*. 2012;9(8):692–698. DOI: <https://doi.org/10.1089/fpd.2011.1083>
7. Yang X., Wu Q., Zhang J., Huang J., Guo W., Cai S. Prevalence and Characterization of Monophasic *Salmonella* Serovar 1,4,[5],12:i:- of Food Origin in China. *PLoS One*. 2015;10(9):e0137967. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137967>
8. Moreno Switt A. I., Soyer Y., Warnick L. D., Wiedmann M. Emergence, distribution, and molecular and phenotypic characteristics of *Salmonella enterica* serotype 4,5,12:i:-. *Foodborne Pathogens and Disease*. 2009;6(4):407–415. DOI: <https://doi.org/10.1089/fpd.2008.0213>

8. Magossi G., Cernicchiaro N., Dritz S., Houser T., Woodworth J., Jones C., Trinetta V. Evaluation of Salmonella presence in selected United States feed mills. *MicrobiologyOpen*. 2019;8(5):e00711. DOI: <https://doi.org/10.1002/mbo3.711>
9. Tulayakul P., Boonsoongnern A., Kasemsuwan S., Ratanavanichrojn N., Netvichian R., Khaodiar S. Heavy metal, Escherichia coli and Salmonella spp. in feeds, reused water, wastewater, and manure from swine farms: a case report. *Natural Science*. 2012;46:882–893. URL: https://kukr.lib.ku.ac.th/kukr_es/KPS_VET/search_detail/download_digital_file/51388/167846
10. Doane C. A., Pangloli P., Richard H. A., Mount J. R., Golden D. A., Draughon F. A. Occurrence of Escherichia coli O157:H7 in diverse farm environments. *Journal of Food Protection*. 2007;70(1):6–10. DOI: <https://doi.org/10.4315/0362-028x-70.1.6>
11. Van Schothorst M., Oosterom J. Enterobacteriaceae as indicators of good manufacturing practices in rendering plants. *Antonie van Leeuwenhoek*. 1984;50:1–6.
12. Jones F. T., Richardson K. E. Salmonella in commercially manufactured feeds. *Poultry Science*. 2004;83(3):384–391. DOI: <https://doi.org/10.1093/ps/83.3.384>
13. Mladenović K. G., Grujović M. Ž., Kiš M., Furmeg S., Jaki Tkalec V., Stefanović O. D., Kocić-Tanackov S. D. Enterobacteriaceae in food safety with an emphasis on raw milk and meat. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2021;105(1):8615–8627. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11655-7>
14. Dee S., Bauermann R., Niederwerder M. E., Singrey A., Clement T., DeLima M. et al. Survival of viral pathogens in animal feed ingredients under transboundary shipping models. *PLoS One*. 2018;13(3):e0194509. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194509>
15. Dee S. A., Neill C. R., Singrey A., Clement T., Cochrane R. A., Jones C. K. et al. Modeling the transboundary risk of feed ingredients contaminated with porcine epidemic diarrhea virus. *BMC Veterinary Research*. 2016;12(1):51. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12917-016-0674-z>
16. Stewart S. C., Dritz S. S., Woodworth J. C., Paulk C., Jones C. K. A review of strategies to impact swine feed biosecurity. *Animal Health Research Reviews*. 2020;21(1):61–68. DOI: <https://doi.org/10.1017/S146625231900015X>
17. Loynachan A. T., Harris D. L. Dose determination for acute Salmonella infection in pigs. *Applied Environmental Microbiology*. 2005;71(5):2753–2755. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.71.5.2753-2755.2005>
18. Cornick N. A., Helgersson A. F. Transmission and infectious dose of Escherichia coli O157:H7 in swine. *Applied and Environmental Microbiology*. 2004;70(9):5331–5335. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.70.9.5331-5335.2004>
19. Niederwerder M. C., Stoian A. M. M., Rowland R. R., Dritz S. S., Petrovan V., Constance L. A. et al. Infectious Dose of African Swine Fever Virus When Consumed Naturally in Liquid or Feed. *Emerging Infectious Diseases*. 2019;25(5):891–897. DOI: <https://doi.org/10.3201/eid2505.181495>
20. Cochrane R. A., Huss A. R., Aldrich G. C., Stark C. R., Jones C. K. Evaluating chemical mitigation of Salmonella Typhimurium ATCC 14028 in animal feed ingredients. *Journal of Food Protection*. 2016;79(4):672–676. DOI: <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-15-320>
21. Cochrane R. A., Dritz S. S., Woodworth J. C., Stark C. R., Huss A. R., Cano J. P. et al. Feed mill biosecurity plans: a systematic approach to prevent biological pathogens in swine feed. *Journal of Swine Health and Production*. 2016;24(3):154–164. DOI: <https://doi.org/10.54846/jshap/952>
22. European Food Safety Authority (EFSA). Microbiological risk assessment in feedingstuffs for food-producing animals – Scientific Opinion of the Panel on Biological Hazards. *EFSA Journal*. 2008;6(7):720. DOI: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2008.720>
23. Gebhardt J. T., Woodworth J. C., Jones C. K., Gauger P. C., Tokach M. D., DeRouchey J. M. et al. Evaluation of the effects of flushing feed manufacturing equipment with chemically- treated rice hulls on porcine epidemic diarrhea virus cross contamination during feed manufacturing. *Journal of Animal Science*. 2018;96(10):4149–4158. DOI: <https://doi.org/10.1093/jas/sky295>
24. Yoder A. D., Stark C. R., DeRouchey J. M., Tokach M. D., Paulk C. B., Gebhardt J. et al. Effect of cleaning corn on mycotoxin concentration and nursery pig growth performance. *Translational Animal Science*. 2021;5(3):txab134. DOI: <https://doi.org/10.1093/tas/txab134>
25. Muckey M. B., Huss A. R., Yoder A., Jones C. Research Note: Evaluating the roles of surface sanitation and feed sequencing on mitigating Salmonella Enteritidis contamination on animal food manufacturing equipment. *Poultry Science*. 2020;99(8):3841–3845. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.04.016>
26. Schumacher L. L., Cochrane R. A., Huss A. R., Stark C. R., Woodworth J. C., Bai J. F. et al. Characterizing the rapid spread of porcine epidemic diarrhea virus (PEDV) through an animal food manufacturing facility. *PLoS One*. 2017;12(11):e0187309. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187309>
27. Gebhardt J. T., Woodworth J. C., Tokach M. D., DeRouchey J. M., Goodband R. D., Jones C. K., Dritz S. S. 285 Medium chain fatty acid mitigation activity against porcine epidemic diarrhea virus (PEDV) in nursery pig diets after 40 d of storage. *Journal of Animal Science*. 2018;96(S2):153. DOI: <https://doi.org/10.1093/jas/sky073.282>

28. Cliver D. O. Capsid and infectivity in virus detection. *Food and Environmental Virology*. 2009;1(3-4):123–128. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12560-009-9020-y>
29. Deng M. Y., Cliver D. O. Antiviral effects of bacteria isolated from manure. *Microbial Ecology*. 1995;30(1):43–54. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00184512>
30. Tun H. M., Cai Z., Khafipour E. Monitoring Survivability and Infectivity of Porcine Epidemic Diarrhea Virus (PEDV) in the Infected On-Farm Earthen Manure Storages (EMS). *Front Microbiol*. 2016;7:265. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00265>
31. Cochrane R. A., Schumacher L. L., Dritz S. S., Woodworth J. C., Huss A. R., Stark C. R. et al. Effect of pelleting on survival of Porcine Epidemic Diarrhea Virus (PEDV)-contaminated feed. *Journal of Animal Science*. 2017;95(3):1170–1178. DOI: <https://doi.org/10.2527/jas.2016.0961>
32. Eklund T. Inhibition of microbial growth at different pH levels by benzoic and propionic acids and esters of p-hydroxybenzoic acid. *International Journal of Food Microbiology*. 1985;2(3):159–167. DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-1605\(85\)90035-2](https://doi.org/10.1016/0168-1605(85)90035-2)
33. Orhan I. E., Özçelik B., Kartal M., Kan Y. Antimicrobial and antiviral effect of essential oils from selected Umbelliferae and Labiatae plants and individual essential oil components. *Turkish Journal of Biology*. 2012;36(3):239–246. DOI: <https://doi.org/10.3906/biy-0912-30>
34. Smith D. J., Oliver C. E., Taylor J. B., Anderson R. C. Efficacy, metabolism, and toxic responses to chlorate salts in food and laboratory animals. *Journal of Animal Science*. 2012;90(11):4098–4117. DOI: <https://doi.org/10.2527/jas.2011-4997>
35. Cochrane R. A., Amachawadi R. G., Remfry S., Lerner A. B., Gebhardt J. T., Nagaraha T. G. et al. 105 Young Scholar Presentation: A review of medium chain fatty acids and their recent role in feed safety. *Journal of Animal Science*. 2018;96(S2):55. DOI: <https://doi.org/10.1093/jas/sky073.103>
36. Dee S., Neil C., Clement T., Christopher-Hennings J., Nelson E. An evaluation of a liquid antimicrobial (Sal CURB®) for reducing the risk of porcine epidemic diarrhea virus infection of naïve pigs during consumption of contaminated feed. *BMC Veterinary Research*. 2014;10:220. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12917-014-0220-9>
37. Dee S., Neill C., Clement T., Singrey A., Christopher-Hennings J., Nelson E. An evaluation of porcine epidemic diarrhea virus survival in individual feed ingredients in the presence or absence of a liquid antimicrobial. *Porcine Health Management*. 2015;1:9. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40813-015-0003-0>
38. Williams H. E., Cochrane R. A., Woodworth J. C., DeRouchey J. M., Dritz S. S., Tokach M. D. et al. Effects of dietary supplementation of formaldehyde and crystalline amino acids on gut microbial composition of nursery pigs. *Nature Scientific Reports*. 2018;8(1):8164. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26540-z>
39. Thomson K. A., Gebhardt J. T., Lerner A. B., Woodworth J. C., Tokach M. D., DeRouchey J. M. et al. 471 Evaluation of medium chain fatty acids as a dietary additive in nursery pig diets. *Journal of Animal Science*. 2018;96(S2):252–253. DOI: <https://doi.org/10.1093/jas/sky073.468>
40. Huss A. R., Schumacher L. L., Cochrane R. A., Poulsen E., Bai J., Woodworth J. C. et al. Elimination of porcine epidemic diarrhea virus in an animal feed manufacturing facility. *PLoS One*. 2017;12(1):e0169612. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169612>
41. Zhao T., Podtburg T. C., Zhao P., Chen D., Baker D. A., Cords B., Doyle M. P. Reduction by competitive bacteria of *Listeria monocytogenes* in biofilms and *Listeria* bacteria in floor drains in a ready-to-eat poultry processing plant. *Journal of Food Protection*. 2013;76(4):601–607. DOI: <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-12-323>
42. Amezcua A., Brashears M. M. Competitive inhibition of *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat meat products by lactic acid bacteria. *Journal of Food Protection*. 2002;65(2):316–325. DOI: <https://doi.org/10.4315/0362-028X-65.2.316>
43. Muthukumarasamy P., Holley R. A. Survival of *Escherichia coli* O157:H7 in dry fermented sausages containing micro-encapsulated probiotic lactic acid bacteria. *Food Microbiology*. 2007;24(1):82–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fm.2006.03.004>
44. Ruiz-Moyano S., Martin A., Benito M. J., Casquete R., Serradilla M. J., de Guia Cordoba M. Safety and functional aspects of pre-selected lactobacilli for probiotic use in Iberian dry-fermented sausages. *Meat Science*. 2009;83(3):460–467. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2009.06.027>
45. Schumacher L. L., Woodworth J. C., Jones C. K., Chen Q., Zhang J., Gauger P. C. et al. Evaluation of the minimum infectious dose of porcine epidemic diarrhea virus in a feed matrix. *American Journal of Veterinary Research*. 2016;77(10):1108–1113. DOI: <https://doi.org/10.2460/ajvr.77.10.1108>
46. Sardella C. A., Petrovan V., Davis S. K., Stewart S. S., Niederwerder M. C., Woodworth J. C. et al. Validation of environmental swabbing to detect Senecavirus A in feed. *Journal of Animal Science*. 2019;97(S2):245–246. DOI: <https://doi.org/10.1093/jas/skz122.433>
47. Schumacher L. L., Cochrane R. A., Huss A. R., Gebhardt J. T., Woodworth J. C., Stark C. R. et al. Feed batch sequencing to decrease the risk of porcine epidemic diarrhea virus (PEDV) cross-contamination during feed manufacturing. *Journal of Animal Science*. 2018;96(11):4562–4570. DOI: <https://doi.org/10.1093/jas/sky320>

Сведения об авторах

✉ **Бурова Ольга Александровна**, заместитель руководителя группы лаборатории эпизоотологии и биоинформатики, Нижегородский научно-исследовательский ветеринарный институт – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Ветеринарная, д. 3, г. Нижний Новгород, Российская Федерация, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5396-0334>, e-mail: burovaolga@list.ru

Широкова Екатерина Алексеевна, заместитель руководителя группы лаборатории эпизоотологии и биоинформатики, Нижегородский научно-исследовательский ветеринарный институт – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Ветеринарная, д. 3, г. Нижний Новгород, Российская Федерация, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6252-5158>

Овсянко Татьяна Владимировна, кандидат вет. наук, заместитель руководителя группы лаборатории эпизоотологии и биоинформатики, Нижегородский научно-исследовательский ветеринарный институт – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Ветеринарная, д. 3, г. Нижний Новгород, Российская Федерация, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7544-0105>

Демидова Татьяна Николаевна, кандидат вет. наук, заместитель руководителя группы лаборатории эпизоотологии и биоинформатики, Нижегородский научно-исследовательский ветеринарный институт – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Ветеринарная, д. 3, г. Нижний Новгород, Российская Федерация, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4866-0636>

Яшин Иван Вячеславович, кандидат биол. наук, директор филиала, Нижегородский научно-исследовательский ветеринарный институт – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Ветеринарная, д. 3, г. Нижний Новгород, Российская Федерация, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7359-2041>

Блохин Андрей Александрович, кандидат вет. наук, заведующий лабораторией эпизоотологии и биоинформатики, Нижегородский научно-исследовательский ветеринарный институт – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Ветеринарная, д. 3, г. Нижний Новгород, Российская Федерация, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5161-1184>

Information about the authors

✉ **Olga A. Burova**, Deputy Head of the group, the Laboratory of Epizootology and Bioinformatics, Nizhny Novgorod Research Veterinary Institute – Branch of Federal Research Center for Virology and Microbiology, Veterinarnaya st., 3, Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5396-0334>, e-mail: burovaolga@list.ru

Ekaterina A. Shirokova, Deputy Head of the group, the Laboratory of Epizootology and Bioinformatics, Nizhny Novgorod Research Veterinary Institute – Branch of Federal Research Center for Virology and Microbiology, Veterinarnaya st., 3, Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6252-5158>

Tatiana V. Ovsyukhno, PhD in Veterinary Science, Deputy Head of the group, the Laboratory of Epizootology and Bioinformatics, Nizhny Novgorod Research Veterinary Institute – Branch of Federal Research Center for Virology and Microbiology, Veterinarnaya st., 3, Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7544-0105>

Tatiana N. Demidova, PhD in Veterinary Science, Deputy Head of the group, the Laboratory of Epizootology and Bioinformatics, Nizhny Novgorod Research Veterinary Institute – Branch of Federal Research Center for Virology and Microbiology, Veterinarnaya st., 3, Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4866-0636>

Ivan V. Yashin, PhD in Biological Science, Director of the Branch, Nizhny Novgorod Research Veterinary Institute – Branch of Federal Research Center for Virology and Microbiology, Veterinarnaya st., 3, Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7359-2041>

Andrey A. Blokhin, PhD in Veterinary Science, Head of the Laboratory of Epizootology and Bioinformatics, Nizhny Novgorod Research Veterinary Institute – Branch of Federal Research Center for Virology and Microbiology, Veterinarnaya st., 3, Nizhny Novgorod, Russian Federation, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5161-1184>

✉ – Для контактов / Corresponding author



Перспективы использования кустарников Европейской части России в животноводстве (обзор)

© 2025. К. С. Инчагова, И. А. Вершинина✉

ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук», г. Оренбург, Российская Федерация

В обзоре представлены сведения о кустарниках родов *Crataegus* L., *Ephedra* L., *Frangula* L., *Prunus* L., *Rhamnus* L., *Rubus* L. различных семейств (*Rosaceae*, *Ephedraceae*, *Rhamnaceae*), традиционно произрастающих в Европейской части России. Данные растения широко известны, как обладающие потенциалом в качестве перспективных источников биологически активных соединений классов терпеноидов, флавоноидов, алкалоидов и антраценпроизводных. Анализ 80 источников научной литературы направлен на поиск новых подходов в профилактике и лечении заболеваний сельскохозяйственных животных, основанных на безопасных и эффективных принципах, так как применение синтезированных лекарственных препаратов сопряжено с развитием нежелательных эффектов, а в случае с антибиотиками – устойчивости бактерий. В этой связи применение природных источников биологически активных веществ имеет преимущества по сравнению с синтезированными препаратами, в таких аспектах, как минимизация побочных эффектов, эффективность и экономическая выгода. В настоящем обзоре проведен анализ значимости растений указанных родов и семейств для животноводства. Представлена информация о содержании биологически активных веществ в этих растениях и их фармакологических свойствах, практическом применении и потенциале для использования в сельском хозяйстве как альтернативы фармацевтическим препаратам, обсуждаются возможности будущих исследований в этом аспекте.

Ключевые слова: *Crataegus*, *Ephedra*, *Frangula*, *Prunus*, *Rhamnus*, *Rubus*, сельское хозяйство, кормление, лекарственные растения

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук» (тема № FNWZ-2025-0003).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Инчагова К. С., Вершинина И. А. Перспективы использования кустарников Европейской части России в животноводстве. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(4):737–748.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.737-748>

Поступила: 24.02.2025

Принята к публикации: 09.07.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

Prospects for the use of shrubs of the European part of Russia in animal husbandry (review)

© 2025. Kseniya S. Inchagova, Irina A. Vershinina✉

Federal Research Centre of Biological Systems and Agro-technologies of the Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russian Federation

The review presents information about shrubs of the genera *Crataegus* L., *Ephedra* L., *Frangula* L., *Prunus* L., *Rhamnus* L., *Rubus* L. of various families (*Rosaceae*, *Ephedraceae*, *Rhamnaceae*), traditionally growing in the European part of Russia. These plants have potential as promising sources of biologically active compounds of the classes of terpenoids, flavonoids, alkaloids and anthracene derivatives. The analysis of 80 sources of scientific literature is aimed at finding new approaches to the prevention and treatment of diseases of farm animals, based on safe and effective principles, since the use of synthesized drugs is associated with the development of undesirable effects, and in the case of antibiotics - bacterial resistance. In this regard, the use of natural sources of biologically active substances has advantages over synthesized drugs in such aspects as minimization of side effects, efficiency and economic benefit. This review analyzes the importance of plants of the specified genera and families for animal husbandry. Information on the content of biologically active substances, pharmacological properties, practical application and potential for use in agriculture as an alternative to pharmaceuticals is presented, and the possibilities for future research in this aspect are discussed.

Keywords: *Crataegus*, *Ephedra*, *Frangula*, *Prunus*, *Rhamnus*, *Rubus*, agriculture, feeding, medicinal plants

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 Federal Research Centre of Biological Systems and Agro-technologies of the Russian Academy of Sciences (theme No. № FNWZ-2025-0003).

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: Inchagova K. S., Vershinina I. A. Prospects for the use of shrubs of the European part of Russia in animal husbandry. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):737–748. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.737-748>

Received: 25.02.2025 Accepted for publication: 09.07.2025 Published online: 29.08.2025

Лекарственные растения и их экстракты уже давно используют для лечения бактериальных инфекций животных и человека, а также заболеваний иной этиологии. Традиционные лекарственные препараты имеют неоспоримое значение и применяются как в медицине, так и ветеринарии. Использование химически синтезированных лекарственных соединений у животных приводит к развитию побочных эффектов и нежелательных последствий [1]. В этой связи применение растительных препаратов медицинского назначения представляется более безопасным и эффективным для использования в ветеринарии и медицине в целом. Потенциалу лекарственных растений, как ценных источников биологически активных веществ (БАВ) с различными полезными свойствами, посвящено большое количество исследований, и их число только увеличивается [2, 3]. Эти соединения природного происхождения характеризуются своей полезностью и минимальными побочными эффектами, обеспечивают широкий спектр применения и имеют низкий риск возникновения нежелательных осложнений по сравнению с синтетическими альтернативами [4]. Изучение веществ, обнаруженных в растениях, которые могут быть использованы в ветеринарии и кормлении животных, следует рассматривать с позиции присутствия тех или иных растений в определенной местности, так как это решает вопросы экономической эффективности и обоснованности их включения в рацион животных. С другой стороны, регулярное и широкое использование растений в кормлении сельскохозяйственных животных требует сбора сведений по поводу их качества, безопасности и эффективности. Таким образом, использование лекарственных растений в животноводстве нуждается в проверенных научных данных и оценке для обоснования их полезности для здоровья живого организма.

Цель обзора – систематизация научных знаний о фармакологических свойствах кустарников родов *Crataegus* L., *Ephedra* L., *Frangula* L., *Prunus* L., *Rhamnus* L., *Rubus* L., произрастающих в Европейской части России, и перспектив их использования в животноводстве.

Материал и методы. В ходе изучения перспектив использования кустарников Европейской части России в животноводстве основ-

ными источниками литературы служили международные базы данных Researcher Gate, Link Springer, Web of Science, Science Direct, MDPI, eLIBRARY.RU, Cyberleninka.

Поиск осуществляли по ключевым словам: *Crataegus*, *Ephedra*, *Frangula*, *Prunus*, *Rhamnus*, *Rubus*, *Frangula alnus*, *Rhamnus cathartica*, *Prunus spinosa*, *Crataegus sanguinea*, *Rubus idaeus*, *Rubus caesius*, *Ephedra distachya*, animal husbandry, animals, agriculture, veterinary medicine, feeding, feed, feed additives, medicinal plants; а также: крушина ломкая, жостер слабительный, слива колючая, терн, боярышник кроваво-красный, малина обыкновенная, ежевика сизая, эфедра двухколосковая, животноводство, животные, сельское хозяйство, ветеринария, кормление, корма, кормовые добавки, лекарственные растения. Критерием включения было соответствие изучаемой тематике применения кустарников Европейской части России в животноводстве. Критерием исключения являлась медицинская тематика изучаемой подборки. Поисковые запросы были объединены в разных вариантах между собой и запрашивались для названий, аннотаций и ключевых слов. Также изучались публикации в списках литературы в найденных источниках. Суммарно в ходе работы над обзором было обработано не менее 200 источников, из которых в список литературы вошли 80 публикаций. Большинство источников не вошло в обзор по причине медицинской тематики статей. Ограничений по географии и временному периоду поиска не вводилось, поскольку обзор отражает все накопленные данные о возможности применения выбранных кустарников в животноводстве.

Основная часть. Семейство крушиновые (*Rhamnaceae*). Род – *Frangula* L.

Frangula alnus Mill. (крушина ломкая) – древовидный кустарник, произрастающий в лесной и лесостепной зонах Европы, центральных районах Западной Сибири, на севере Малой Азии, большей части Крыма и Кавказа, в северных районах Средней Азии, в том числе и Оренбургской области [5]. Данный вид считается инвазивным растением в некоторых частях земного шара [6]. В литературе описаны его биологические эффекты в отношении человека и животных, которые могут найти широкое применение в медицине и ветеринарии.

Растения, принадлежащие к семейству крушиновых, являются основным источником антраценпроизводных и их гликозидов, которые оказывают выраженное слабительное действие.

Известно, что этилацетатный экстракт крушины ломкой обладает значительной антибактериальной и антибиопленочной активностью в отношении клинических изолятов *Staphylococcus aureus* [7]. В другой работе показано влияние экстракта крушины ломкой, полученного с применением разных растворителей, в комплексе с ципрофлоксацином и эритромицином в отношении *Staphylococcus aureus* и *Escherichia coli*. В ходе исследования было выявлено увеличение антибактериальной активности в отношении тест-штаммов в 2 раза [8]. Во многих работах в качестве основного компонента, оказывающего противомикробное действие, указывается эмодин (1,6,8-тригидрокси-3-метилантрахинон). Помимо антибактериального действия, экстракт данного растения обладает антиоксидантной активностью [9], что может быть связано с содержанием в его составе соединений фенольной природы. В работе [10] показано, что активный компонент коры крушины ломкой – эмодин обладает цитогенотоксичностью в отношении лимфоцитов периферической крови человека, причем в механизме токсичности участвует окислительный стресс, поэтому экстракт коры крушины ломкой, а также выделенный из растения эмодин необходимо применять с осторожностью.

Что же касается использования крушины ломкой в кормлении сельскохозяйственных животных, данные немногочисленны. В работе [11] показано влияние крушины на потребление корма, усвояемость и ферментацию рубца у овец. Известно, что кора крушины ломкой *in vitro* приводит к дозозависимому линейному снижению выработки метана и соотношения ацетата к пропионату, что потенциально позволит обеспечить снижение выбросов метана при ферментации в рубце [12]. Также есть упоминание об употреблении крупным рогатым скотом крушины наряду с другими кустарниками в работе [13]. Бóльшая же часть работ, в которых приводятся данные по крушине, посвящена организации пастбищных угодий и выпасу скота, а также ее поеданию дикими животными [14, 15].

*Семейство крушиновые (Rhamnaceae).
Род – Rhamnus.*

Rhamnus cathartica L. (*жостер слабительный*) – крупный кустарник или небольшое дерево, произрастающее на бóльшей части

территории Европы и Восточной Азии, инвазивное в Северной Америке. В пределах своего широкого распространения жостер слабительный встречается в различных местах обитания – от городских лесов до болот. Растение теневыносливо, предпочитает нарушенные участки с влажными, но не насыщенными почвами, может адаптироваться к щелочным почвам с высоким содержанием карбоната кальция [16].

Исследователями было показано, что ряд малых молекул растительного происхождения, идентифицированных в экстракте жостера слабительного, обладает антибактериальной и фунгицидной активностью в отношении патогенов бактериального и грибкового происхождения [17]. В работе [18] было показано антибактериальное и кворум-ингибирующее (воздействие на плотностно-зависимую химическую коммуникацию, более известную как «кворум-сенсинг») действие экстракта семян жостера слабительного в отношении бактериальных патогенов с определением фитохимического состава данного экстракта. Фитохимический анализ показал, что основным компонентом экстракта является кемпферол. Вычислительный анализ показал, что кемпферол может ингибировать систему «кворум-сенсинга», что может быть использовано при создании антибактериальных средств нового принципа действия, направленных на угнетение системы «кворум-сенсинга», используемой бактериями для реализации своего патогенного потенциала. Также было показано, что экстракт жостера слабительного оказывает сильное антипаразитарное действие в отношении *Leishmania major*, что делает данное растение перспективным кандидатом для разработки препарата для лечения лейшманиоза [19].

В работе [20] показана противомаларийная активность нано-эмодина, выделенного из жостера слабительного, в отношении *Plasmodium berghei* в эксперименте на мышах, в ходе которого побочных эффектов не наблюдали. Тест на токсичность не показал токсического воздействия на мышей. В связи с этим применение жостера слабительного может рассматриваться как кормовая добавка, альтернативная антибиотикам для сельскохозяйственных животных.

С другой стороны, наряду с положительными эффектами экстракта жостера слабительного в отношении патогенов различной этиологии в литературе имеются данные и о неблагоприятном воздействии этого экстракта на животный организм. В работе [21] приведено

исследование экстракта жостера слабительного на мышцах с целью выявления его токсического эффекта после обнаружения идиопатического неврологического заболевания у лошадей. Рацион мышей был составлен с добавлением 0,5, или 25 % экстракта. При этом печень мышей имела выраженный гепатоцеллюлярный отек, вызванный отложениями моночастичного гликогена (β -частиц) в цитоплазме. Отложение гликогена в клетках является редким токсическим явлением. Вероятно, соединение(я), входящие в состав жостера слабительного, прямо или косвенно вмешивались в метаболизм гликогена (гликогенез или гликогенолиз).

Другой пример токсического действия компонентов данного экстракта, а именно эмодаина, представлен в работе [22], в ходе которой эксперимент проводили на головастиках зеленой лягушки (*Lithobates clamitans*). В ходе эксперимента было выявлено, что после 21 дня воздействия высоких концентраций эмодаина в контролируемой среде происходит образование фиброза тканей печени, пролиферация желчных протоков, гепатоцеллюлярный отек, скопление хлопьевидного осадка в желчном пузыре и желчных протоках, соответствующего эмодину. Все вышеперечисленное способствовало возникновению гепатоцеллюлярного некроза и преждевременной смертности объектов исследования. Кроме того, известны случаи отравления жостером слабительным у людей [23].

Таким образом, имеющиеся противоречивые научные данные показывают, с одной стороны, перспективу применения жостера слабительного в животноводстве, состоящую в разработке ветеринарных препаратов антибактериального, фунгицидного и протозойного действия. С другой стороны, возможное использование данного растения в кормлении животных требует тщательного анализа токсичности жостера слабительного с определением безопасного уровня его потребления.

Семейство Розоцветные (Rosaceae или Розовые Adans). Под – Prunus L.

Prunus spinosa L. (слива колючая, терн) – колючий листопадный кустарник, дающий небольшие фиолетовые съедобные плоды. Этот вид встречается в основном от юга Центральной Европы до юга Скандинавии и на восток до Малой Азии, растёт на опушках лесов и в редколесьях как часть средиземноморских термофильных растительных сообществ. Выращивают как декоративное и фрук-

товое растение, используют для приготовления джемов, вина, уксуса и дистиллятов [24].

Литература имеет большой массив данных об исследовании БАВ разных частей сливы колючей [25]. Например, плоды терна в последнее время все чаще привлекают внимание исследователей как функциональный продукт питания, богатый высоким содержанием биоактивных соединений, для применения в пищевой и фармацевтической промышленности [26]. В работе [27] сообщается о применении цветов терна для лечения расстройств мочевыводящих путей, воспалений и сопутствующей терапии сердечно-сосудистых заболеваний. Работа [28] посвящена сравнительному исследованию антибактериальной и антиоксидантной активности *n*-гексановых, дихлорметановых и метанольных экстрактов семян *Prunus padus* и *Prunus spinosa*, а также определена общая токсичность этих экстрактов. Влияние водного экстракта ветвей сливы колючей на семявыводящий проток и двенадцатиперстную кишку морской свинки описано в работе [29].

Отметим, что большинство работ посвящено исследованиям БАВ сливы колючей *in vitro* с перспективой их использования в медицине. Так было показано, что этанольный экстракт плодов терна обладает антиоксидантной, противовоспалительной и антимикробной активностью в отношении бактериальных и дрожжевых культур [30]. В другой работе исследовались разные экстракты из листьев сливы колючей [31]. Результаты экспериментов показали антиоксидантную, антибактериальную, противогрибковую активность, а также этанольный экстракт проявил ингибирующую активность в отношении ферментов, связанных с сахарным диабетом II типа. Кроме того, водный экстракт сливы колючей характеризовался противоопухолевым действием на следующие линии злокачественных клеток: HeLa, K562 и MDA-MB-453. Схожие результаты были получены в работе [32] при исследовании экстрактов плодов сливы колючей. Сообщается, что этанольный экстракт показал наиболее выраженные антиоксидантную и противомикробную активность, а также потенциальный антидиабетический эффект по сравнению с водным экстрактом. Однако ни один из экстрактов не проявил противоопухолевого действия в экспериментах *in vitro*.

Данные об использовании сливы колючей в кормлении сельскохозяйственных животных немногочисленны. В работе [33] есть упомин-

вание об употреблении терна копытными животными, в частности благородным оленем *Cervus elaphus*, в работе [34] сообщается о поедании терновника крупнорогатым скотом и кроликами. Однако в обеих работах не было исследовано влияние данного растения на микробиом кишечника и другие физиологические показатели организма животного. В работе [35] показано негативное влияние терновника на кожу лошадей при их выпасе в непосредственной близости с данным растением, связанное с травматизацией тканей животного шипами терна. Данные об использовании фермерами сливы колючей для лечения домашних животных представлены в работе [36].

Семейство Розоцветные (Rosaceae или Розовые Adans). Под – Crataegus L. Crataegus sanguinea Pall. (боярышник кроваво-красный) – растет в Сибири, на востоке европейской части России, в Заволжье, на Среднем и Южном Урале и в Алтайском крае. Сырье растений рода *Crataegus* L. включено во многие Фармакопеи мира [37]. Цветки и плоды боярышника кроваво-красного применяются в медицинской практике в качестве кардиотонических средств [38]. Побеги боярышника кроваво-красного содержат флавоноиды (гиперозид, витексин, 2"-О-рамнозид, апигенин, космосин, лютеолин, цинарозид, кверцетин, рутин, физетин, нарингин, гесперидин, дигидрокверцетин, катехин и процианидин), фенилпропаноиды (кофейная кислота, хлорогеновая кислота), сапонины, витамины и многие другие вторичные и первичные метаболиты [39].

Помимо известного кардиотонического и диуретического действия [40] показано, что водные и спиртовые настои боярышника кроваво-красного обладают антимуtagenным эффектом при обработке ими семян ячменя *Hordeum vulgare* L. [41]. Полученный результат позволяет предположить, что использование настоев боярышника кроваво-красного может быть эффективным для защиты живых объектов от мутагенных факторов окружающей среды. Экстракт *Crataegus sanguinea* Pall. обладает как антимуtagenным, так и противоопухолевым эффектом, что было продемонстрировано в эксперименте с культурой клеток *in vitro*, показавшем, что отсутствует ингибирование роста или увеличение гибели клеток на нормальных фибробластах мышей, но происходит более сильное ингибирование роста клеток и увеличение гибели опухолевых клеток Нер-2 и MGC-803 [42].

В работе [43] выявлены антибактериальная и противогрибковая активность этанольного экстракта боярышника кроваво-красного в отношении штаммов *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Bacillus cereus*, *Candida albicans*. Однако на фоне положительных эффектов применения экстрактов этого растения в медицинской практике существует вероятность неблагоприятных последствий после приема боярышника кроваво-красного, заготовленного в городских условиях, связанная с возможным накоплением в листьях тяжелых металлов [44]. Показано, что данное растение может быть использовано в качестве индикатора загрязнения на урбанизированных территориях. Поэтому при отборе сырья боярышника кроваво-красного должна проводиться оценка на предельно-допустимые показатели содержания тяжелых металлов.

Таким образом, использование боярышника кроваво-красного перспективно с точки зрения, прежде всего ветеринарии, для создания препаратов антибактериального, фунгицидного, противоопухолевого, кардиотонического и диуретического действия.

Семейство Розоцветные (Rosaceae или Розовые Adans). Под – Rubus L.

Rubus idaeus L. (малина обыкновенная) – травянистое растение семейства розоцветных, представляет собой кустарник, описываемый как нанофанерофит. *Rubus idaeus* L., как дикое растение, обычно растет в лесах, образуя разреженные насаждения под пологом деревьев и более густые насаждения на полянах. На юге своего ареала (юг Европы и Центральная Азия) этот вид встречается только на больших высотах в горах [45]. Малина является богатым источником углеводов, пищевых волокон, витаминов, минералов, белков и других БАВ, таких как фенолы, каротиноиды, токоферолы и ненасыщенные жирные кислоты, которые полезны для профилактики таких заболеваний, как диабет, ожирение и рак, вызванных окислением биологических субстратов свободными радикалами. В работе [46] было продемонстрировано *in vitro*, что фенолы, экстрагированные из плодов малины, обеспечивают эффективное ингибирование перекисного окисления липидов. Это делает плоды малины перспективными добавками в корма животным для предотвращения окисления компонентов корма и снижения окислительного стресса в организме животных благодаря своей способности реагировать со свободными радикалами [46].

Растение применяют в фармацевтической, косметической, сельскохозяйственной и пищевой промышленности не только в свежем виде, но и в качестве переработанного продукта [47]. Листья малины используют в качестве дополнения к напиткам, пищевым добавкам, чаем и шоколаду с целью усиления их питательных и вкусовых свойств [48].

Литература имеет большой массив данных о БАВ малины обыкновенной. В работе [49] было показано, что малина обыкновенная обладает сильным антиоксидантным действием и демонстрирует значительный бактерицидный эффект в отношении штамма *Corynebacterium diphtheriae*. Также исследуемый экстракт показал высокую цитотоксическую активность по отношению к клеткам HL-60. Менее выраженный цитотоксический эффект наблюдался для клеток HeLa. Кроме того, показано, что доминирующими соединениями, идентифицированными в побегах малины обыкновенной, были эллаговая кислота и сангвин Н-6. Схожие результаты по антибактериальной и антиоксидантной активности были получены и в работе [50]. Показано, что листья, соцветия и плоды малины могут эффективно бороться с грамположительными бактериями *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis* и *Listeria monocytogenes*. Среди различных частей растения экстракты корней и семян имели самую низкую антибактериальную активность. Данные показали умеренную, слабую или очень слабую корреляцию между антимикробной активностью и параметрами содержания фенолов. В работе [51] было проведено сравнение антимикробной активности экстрактов, полученных из разных сортов малины обыкновенной, фенольного соединения сангвина Н-6, свободной эллаговой кислоты и антоцианов в отношении пятнадцати штаммов бактерий. Антимикробная активность экстрактов малины варьировала и зависела от анализируемого штамма бактерий и сорта, за исключением *Helicobacter pylori*, по отношению к которому экстракты продемонстрировали одинаковую активность ингибирования роста. Наиболее чувствительными к экстрактам малины отмечены *Corynebacterium diphtheriae* и *Moraxella catarrhalis*. В отличие от экстрактов, сангвин Н-6 и эллаговая кислота были активны только против восьми и девяти штаммов бактерий соответственно, что может свидетельствовать о необходимости формирования композиции малых молекул, входящих в состав цельного экстракта, которые бы

усиливали действие каждого компонента и тем самым проявляли значительную антимикробную активность.

Работа [52] посвящена исследованию экстрактов выжимок двух сортов малины обыкновенной Meeker и Willamette. Авторами было определено общее содержание фенолов, флавоноидов и антоцианов, показана значительная антиоксидантная, антипролиферативная, проапоптотическая и антибактериальная активность малиновых выжимок.

Исследования по использованию малины обыкновенной в кормлении сельскохозяйственных животных немногочисленны. Так, в работе [53] представлены данные о кормлении гибридных коров F1 Hereford × Aberdeen Angus листьями и побегами двух сортов малины обыкновенной, ежевики и черной смородины. Наиболее высокую поедаемость имели листья и ветки малины. В работе [54] сообщается об использовании *Rubus sp.* для повышения молочной продуктивности у жвачных животных. Важно отметить, что эта работа построена на опросе фермеров и не содержит экспериментальных данных. В работе [55] также сообщается о выпасе скота на пастбищах с разными видами деревьев и кустарников с указанием предпочтительных видов, поедаемых животными, в числе которых была и малина обыкновенная. Авторы отмечают, что данные результаты могут быть использованы для создания кормовой добавки к основному рациону крупного рогатого скота и разработки целевых лесопастбищных систем в Альпах. Однако во всех этих работах не проводилось исследований влияния экстрактов на физиологические и биохимические показатели крови, микробиом кишечника и другие.

Rubus caesius L. (ежевика сизая) – кустарник, достигающий 50–150 см в высоту. Широко распространена в Европе, Азии и Северной Америке. Данное растение растёт в лесах, среди кустарников, по вырубкам, по берегам ручьев и рек, лесным и пойменным лугам, садам, огородам, часто растёт зарослями [56]. В народной медицине ежевика сизая используется для лечения гипергликемии, диареи и воспаления [57].

Биологическая активность экстракта ежевики сизой описана достаточно хорошо. В работе [58] показано, что экстракты листьев ежевики сизой, наряду с малиной обыкновенной, значительно модулируют реактивность тромбоцитов в цельной крови, влияя на агре-

гацию тромбоцитов, возможно, посредством модуляции окислительно-восстановительного статуса, зависящего от окислительной активности нейтрофилов. В другой работе [59] для этих же экстрактов выявлена значительная антиоксидантная активность, которую авторы связывают с общим содержанием полифенолов в экстрактах. Однако результаты этих исследований свидетельствуют, что в условиях *in vitro* экстракты ежевики и малины оказывают неблагоприятное воздействие на эндотелиальные клетки.

Результаты качественного фитохимического анализа показали наличие флавоноидных агликонов и флавоноидных гликозидов с наибольшим количеством тилирозида, гипериозида, изокверцетина, астрагалина, рутина и катехина в этанольных экстрактах листьев и стеблей ежевики. Тесты DPPH и FRAP доказали высокую антиоксидантную активность экстрактов, а анализ на антигиалуронидазу впервые показал, что водные и этанольные экстракты ежевики, полученные из стеблей, демонстрируют способность ингибировать активность гиалуронидазы. Также значительную антимикробную активность водных и этанольных экстрактов наблюдали в отношении анаэробных спорообразующих палочек *Clostridium bifermentans* и *Clostridium sporogenes*, а также *Enterococcus faecalis* [60]. В работе [61] результаты исследований также показали присутствие в листьях ежевики сизой биологически активных соединений, таких как флавоноиды и дубильные вещества. Более того, на модели сахарного диабета у лабораторных крыс показана гипогликемическая активность водного экстракта листьев ежевики.

Также, как и по малине обыкновенной, исследований по ежевике сизой в кормлении сельскохозяйственных животных немного. В работе [62] авторы оценили пищевую ценность листьев и побегов *R. caesius* весной и летом в регионе Эскишехир (Турция), в вышеописанной работе [53] представлены данные о кормлении гибридных коров F1 Hereford × Aberdeen Angus листьями ежевики сизой наряду с малиной обыкновенной и смородиной черной. В работе [63] описан рацион лошадей и ослов, состав которого дополнен ветками и листьями ежевики сизой.

Семейство Эфедровые (*Ephedraceae*).
Род – *Ephedra* L.

Ephedra distachya L. (эфедра двухколосковая) – безлистный кустарник с ползучим

корневищем из семейства Эфедровые. Растет пятнами среди зарослей полыни на останцовых холмах [64]. Его можно найти в Северной Африке (Марокко, Алжир), в песчаных дюнах умеренных пустынь, таких как Гурбантунгют в Джунгарской котловине (северо-западный Китай) и в Центральной Азии. Данный вид растения также произрастает в степях Ульяновской и Оренбургской областей России, на Балканском полуострове в Сербии и в дюнах Летеа в Румынии [65]. Лекарственные виды используются в качестве стимуляторов функций организма и противоастматических средств для лечения простуды, бронхиальной астмы, кашля, лихорадки, гриппа, головной боли, отеков и аллергии [66]. Полученные данные могут стать основанием для проведения дальнейших исследований возможности использования эфедры двухколосковой для лечения заболеваний верхних дыхательных путей у сельскохозяйственных животных и разработки ветеринарных препаратов.

Лечебные свойства эфедры двухколосковой связывают с присутствием в ее составе композиций алкалоидных, фенольных и флавоноидных соединений [67].

Данные об использовании эфедры двухколосковой в кормлении животных немногочисленны и противоречивы. В работе [64] показано, что эфедра двухколосковая относится к ядовитым не поедаемым растениям, вызывающим острое отравление со смертельным исходом. Авторы этой работы отмечают, что ядовитые растения, к числу которых относится и эфедра, представляют угрозу для животноводства. Так, в Туркменистане летом 2024 г. неоднократно наблюдали массовое отравление коз, которых пастухи предпочитали резать на мясо, так как выздоровление бывает редким. У коз начинался понос, затем появлялись судороги со смертельным исходом. Однако в работе [68] сообщается, что эфедра, наряду с другими растениями, входит в рацион сайгака, отличается питательными и лечебными свойствами, но не поедается сельскохозяйственными животными. Также в работе [69] упоминается, что эфедра двухколосковая входит в состав рациона лошади Пржевальского, а в работе [70] описано влияние микробиома кишечника иранских баранов уриалов (*Ovis vignei*) на усвояемость танинов из некоторых пустынных растений, в число которых входила и эфедра. Противоречивость данных свидетельствует о том, что этот вид растений

следует использовать с осторожностью и требует более глубоких исследований на физиологические и биохимические показатели животного организма.

Заключение. Лекарственные растения являются наиболее распространенным источником биологически активных веществ [71, 72]. Сегодня многие из них являются культурными растениями. Тем не менее, их использование в сельском хозяйстве недооценено и ограничивается лишь точечным применением в подсобных хозяйствах, что создает потребность в более глубоких исследованиях, направленных на оценку генетических и метаболических профилей как самих растений и их компонентов, так и механизмов их действия на организм животного. Следовательно, существует необходимость анализа их влияния на здоровье животных, в том числе и для их использования в кормлении, а также в качестве ветеринарных препаратов [73, 74].

В данном аспекте представленные в обзоре растения родов *Crataegus* L., *Ephedra* L., *Frangula* L., *Prunus* L., *Rhamnus* L., *Rubus* L. являются кандидатами для разработки кормовых добавок и ветеринарных препаратов для животных ввиду минимальных побочных эффектов, широкого спектра применения и низкого риска возникновения нежелательных осложнений по сравнению с синтетическими альтернативами [4]. В то же время необходимо проведение углубленных исследований токсичности растений родов *Crataegus* L., *Ephedra* L., *Rhamnus* L. по отношению к животным.

Произрастание растений, представленных в обзоре, в Европейской части России решает вопросы экономической эффективности создания

препаратов и добавок на их основе. Перспективы использования данных растений состоят в добавлении зеленой растительной массы непосредственно в корм, что позволит повысить его вкусовую привлекательность и поедаемость. При этом животные могут употреблять свежие листья, соцветия, стебли и другие части растения, которые будут добавлены в рацион, исходя из максимального содержания в них биологически активных веществ. Экстракты растений могут быть использованы для добавления в питьевую воду животным, а засушенная масса растений – в качестве концентрированного источника биологически активных веществ [75].

Направления дальнейших исследований в данной области заключаются в том, что для определения качественного и количественного наличия ценных БАВ необходимы фитохимические, хроматографические и фотометрические анализы жидкостей и летучих веществ, а также микроскопические анализы твердого растительного материала [76, 77]. В том числе, необходимы исследования биологически активных веществ растений родов *Crataegus* L., *Ephedra* L., *Frangula* L., *Prunus* L., *Rhamnus* L., *Rubus* L. для понимания путей их метаболизма в организме животных после применения. Сегодня важным становится вопрос о том, где потенциалы и где риски использования лекарственного растительного материала [78, 79, 80]. Все вышесказанное составляет основу для дальнейших углубленных исследований растений родов *Crataegus* L., *Ephedra* L., *Frangula* L., *Prunus* L., *Rhamnus* L., *Rubus* L. и компонентов, входящих в их состав.

References

1. Elkholly D. A., Brodbelt D. C., Church D. B., Pelligand L., Mwacalimba K., Wright A. K., O'Neill D. G. Side effects to systemic glucocorticoid therapy in dogs under primary veterinary care in the UK. *Frontiers in Veterinary Science*. 2020;7:515. DOI: <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00515>
2. Noor F., Tahir ul Qamar M., Ashfaq U. A., Albutti A., Alwashmi A. S., Aljasir M. A. Network pharmacology approach for medicinal plants: review and assessment. *Pharmaceuticals*. 2022;15(5):572. DOI: <https://doi.org/10.3390/ph15050572>
3. Abdallah E. M., Alhatlani B. Y., de Paula Menezes R., Martins C. H. G. Back to Nature: Medicinal plants as promising sources for antibacterial drugs in the post-antibiotic era. *Plants*. 2023;12(17):3077. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12173077>
4. Cui M., Cheng L., Zhou Z., Zhu Z., Liu Y., Li C. et al. Traditional uses, phytochemistry, pharmacology, and safety concerns of hawthorn (*Crataegus* genus): A comprehensive review. *Journal of ethnopharmacology*. 2024;319(2):117229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jep.2023.117229>
5. Bussmann R. W., Paniagua-Zambrana N. Y., Kikvidze Z., Batsatsashvili K., Khutsishvili M., Maisaia I. et al. *Frangula alnus* Miller, *Rhamnus cathartica* L., *Rhamnus imeretina* Booth, Petz., G. Kirchn. Rhamnaceae. In: Bussmann, R.W. (eds) *Ethnobotany of the Caucasus. Ethnobotany of Mountain Regions*. Springer, Cham, 2025. pp. 1–16. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-50009-6_319-1
6. Lee T. D., Eisenhaure S. E., Gaudreau I. P. Pre-logging treatment of invasive glossy buckthorn (*Frangula alnus* Mill.) promotes regeneration of eastern white pine (*Pinus strobus* L.). *Forests*. 2017;8(1):16. DOI: <https://doi.org/10.3390/f8010016>

7. Đukanović S., Cvetković S., Lončarević B., Lješević M., Nikolić B., Simin N. et al. Antistaphylococcal and bio-film inhibitory activities of *Frangula alnus* bark ethyl-acetate extract. *Industrial Crops and Products*. 2020;158:113013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113013>
8. Nejbatdoust A., Daemi H. B., Salehzadeh A. Comparing of Effects of Hydro-alcoholic, Ethanolic, and Methanolic Extracts of the *Frangula alnus*: Chemical Composition, Antimicrobial, and Synergism. *Journal of Genetic Resources*. 2020;6(1):20–33. DOI: <https://doi.org/10.22080/jgr.2020.2538>
9. Kremer D., Kosalec I., Locatelli M., Epifano F., Genovese S., Carlucci G., Končić M. Z. Anthraquinone profiles, antioxidant and antimicrobial properties of *Frangula rupestris* (Scop.) Schur and *Frangula alnus* Mill. *Bark. Food Chemistry*. 2012;131(4):1174–1180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.09.094>
10. Brkanac S. R., Gerić M., Gajski G., Vujčić V., Garaj-Vrhovac V., Kremer D., Domijan A. M. Toxicity and antioxidant capacity of *Frangula alnus* Mill. bark and its active component emodin. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. 2015;73(3):923–929. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2015.09.025>
11. García-González R., Giráldez F. J., Mantecón A. R., González J. S., López S. Effects of rhubarb (*Rheum* spp.) and frangula (*Frangula alnus*) on intake, digestibility and ruminal fermentation of different diets and feedstuffs by sheep. *Animal Feed Science and Technology*. 2012;176(1-4):131–139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2012.07.016>
12. García-González R., López S., Fernández M., González J. S. Dose–response effects of *Rheum officinale* root and *Frangula alnus* bark on ruminal methane production in vitro. *Animal Feed Science and Technology*. 2008;145(1-4):319–334. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.05.040>
13. Nota G., Svensk M., Barberis D., Frund D., Pagani R., Pittarello M. et al. Foraging behavior of Highland cattle in silvopastoral systems in the Alps. *Agroforestry System*. 2024;98:491–505. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00926-z>
14. Labokas J., Karpaviciene B. Development of a Methodology for Maintenance of Medicinal Plant Genetic Reserve Sites: A Case Study for Lithuania. *Plants*. 2021;10(4):658. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10040658>
15. Klich D. Influence of primitive Biłgoraj horses on the glossy buckthorn (*Frangula alnus*)-dominated understory in a mixed coniferous forest. *Acta Oecologica*. 2018;87:8–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actao.2018.01.002>
16. Kurylo J. S., Knight K. S., Stewart J. R., Endress A. G. *Rhamnus cathartica*: Native and naturalized distribution and habitat preferences. *The Journal of the Torrey Botanical Society*. 2007;134(3):420–430. DOI: [https://doi.org/10.3159/1095-5674\(2007\)134\[420:RCNAND\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.3159/1095-5674(2007)134[420:RCNAND]2.0.CO;2)
17. Hamed M. M., Refahy L. A., Abdel-Aziz M. S. Evaluation of Antimicrobial Activity of Some Compounds Isolated from *Rhamnus cathartica* L. *Oriental Journal of Chemistry*. 2015;31(2):1133–1140. DOI: <https://doi.org/10.13005/ojc/310266>
18. Ibrahim B., Reis A., Arin U. E., Muhammed M. T., Onem E. An Evaluation of the Anti-QS Activity and Virulence Factors Production Potential of *Rhamnus cathartica* L. against Some Gram-Positive and Gram-Negative Bacteria. *Medicine and Pharmacology*. 2023 (Preprints). DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints202312.1822.v1>
19. Hedayati P., Chabra A., Parandin F., Rahimi Esboei B. Anti-leishmaniasis activity of *Rhamnus cathartica* on amastigote stages of *Leishmania major*. *International Journal of Molecular and Clinical Microbiology*. 2023;13(1):1802–1809. DOI: <https://doi.org/10.22034/IJMCM.2023.703699>
20. Bayat F., Haghi A. M., Nateghpour M., Rahimi-Esboei B., Foroushani A. R. et al. Cytotoxicity and Anti-Plasmodium berghei Activity of Emodin Loaded Nanoemulsion. *Iranian Journal of Parasitology*. 2022;17(3):339–348. DOI: <https://doi.org/10.18502/ijpa.v17i3.10624>
21. Lichtensteiger C. A., Johnston N. A., Beasley V. R. *Rhamnus cathartica* (Buckthorn) Hepatocellular Toxicity in Mice. *Toxicologic pathology*. 1997;25(5):449–452. DOI: <https://doi.org/10.1177/019262339702500503>
22. Brenes R., Nguyen L. M. N., Miller D. L., Rohde M. L. Hepatocellular toxicity of the metabolite emodin produced by the common buckthorn (*Rhamnus cathartica*) in green frog (*Lithobates clamitans*) tadpoles. *Journal of Wildlife Diseases*. 2022;58(2):341–347. DOI: <https://doi.org/10.7589/JWD-D-21-00040>
23. *Rhamnus cathartica*. *Reactions Weekly*. 2011;1347:34. DOI: <https://doi.org/10.2165/00128415-201113470-00113>
24. Popescu I., Caudullo G. *Prunus spinosa* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. 2016. In book: *European Atlas of Forest Tree Species*. Editors: San-Miguel-Ayaz J., de Rigo D., Caudullo G., Durrant T. H., Mauri A. Publisher: Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2016. pp. e018f4e+. URL: https://www.researchgate.net/publication/299471144_Prunus_spinosa_in_Europe_distribution_habitat_usage_and_threats
25. Bei M. F., Apahidean A. I., Budau R., Rosan C. A., Popovici R., Memete A. R. et al. An Overview of the Phytochemical Composition of Different Organs of *Prunus spinosa* L., Their Health Benefits and Application in Food Industry. *Horticulturae*. 2024;10(1):29. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae10010029>
26. Marcetic M., Samardzic S., Ilic T., Bozic D. D., Vidovic B. Phenolic Composition, Antioxidant, Anti-Enzymatic, Antimicrobial and Prebiotic Properties of *Prunus spinosa* L. *Fruits. Foods*. 2022;11(20):3289. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11203289>
27. Marchelak A., Owczarek A., Matczak M., Pawlak A., Kolodziejczyk-Czepas J., Nowak P., Olszewska M. A. Bioactivity Potential of *Prunus spinosa* L. Flower Extracts: Phytochemical Profiling, Cellular Safety, Pro-inflammatory Enzymes Inhibition and Protective Effects Against Oxidative Stress *In Vitro*. *Frontiers in Pharmacology*. 2017;8:680. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2017.00680>
28. Kumarasamy Y., Cox P. J., Jaspars M., Nahar L., Sarker S. D. Comparative studies on biological activities of *Prunus padus* and *P. spinosa*. *Fitoterapia*. 2004;75(1):77–80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2003.08.011>
29. Rodriguez R., Lasheras B., Cenarruzabeitia E. Pharmacological Activity of *Prunus spinosa* on Isolated Tissue Preparations. *Planta Medica*. 1986;52(4):256–259. DOI: <https://doi.org/10.1055/s-2007-969145>

30. Sabatini L., Fraternale D., Di Giacomo B., Mari M., Albertini M. C., Gordillo B. et al. Chemical composition, antioxidant, antimicrobial and anti-inflammatory activity of *Prunus spinosa* L. fruit ethanol extract. *Journal of Functional Foods*. 2020;67:103885. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2020.103885>
31. Velickovic I., Zizak Z., Rajcevic N., Ivanov M., Sokovic M., Marin P. D., Grujic S. *Prunus spinosa* L. leaf extracts: polyphenol profile and bioactivities. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2021;49(1):12137. DOI: <https://doi.org/10.15835/NBHA49112137>
32. Velickovic I., Zizak Z., Rajcevic N., Ivanov M., Sokovic M., Marin P. D., Grujic S. Examination of the polyphenol content and bioactivities of *Prunus spinosa* L. fruit extracts. *Archives of Biological Sciences*. 2020;72(1):105–115. DOI: <https://doi.org/10.2298/ABS191217004V>
33. Facciolati V., Zarek M., Błońska E., Lasota J., Orman O., Ciach M. To be browsed or not to be browsed: differences in nutritional characteristics of blackthorn *Prunus spinosa* subject to the long-term pressure of herbivores. *bioRxiv*. 2024. (Preprint). DOI: <https://doi.org/10.1101/2024.04.04.588043>
34. Smit C., Bakker E. S., Apol M. E. F., Olff H. Effects of cattle and rabbit grazing on clonal expansion of spiny shrubs in wood-pastures. *Basic and Applied Ecology*. 2010;11(8):685–692. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.baec.2010.08.010>
35. Ashton N. M., Doles J. Plant Thorn Synovitis Caused by *Prunus Spinosa* (Blackthorn) Penetration in 35 Horses. *Equine Veterinary Journal*. 2015;S47:17. DOI: <https://doi.org/10.1111/evj.12486>
36. Bullitta S., Re G. A., Manunta M. D. I., Piluzza G. Traditional knowledge about plant, animal, and mineral-based remedies to treat cattle, pigs, horses, and other domestic animals in the Mediterranean island of Sardinia. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*. 2018;14:50. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13002-018-0250-7>
37. Sagaradze V. A., Babaeva E. Y., Kalenikova E. I., Trusov N. A., Peshchanskaya E. V. Quantitative Anatomical Characteristics of the Leaf Blades of the Several Species of *Crataegus* L. Drug development & registration. 2021;10(4):138–146. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33380/2305-2066-2021-10-4-138-146> EDN: YXIKQJ
38. Волкова Н. А., Куркин В. А., Правдивцева О. Е., Куркина А. В., Варина Н. Р., Шарова О. В. Исследования по разработке методики количественного анализа побегов боярышника кроваво-красного. *Фармация*. 2021;70(5):22–26. DOI: <https://doi.org/10.29296/25419218-2021-05-03> EDN: JPNEEP
- Volkova N. A., Kurkin V. A., Pravdivtseva O. E., Kurkina A. V., Varina N. R., Sharova O. V. Investigations for the development of a procedure for the quantitative analysis of redhaw hawthorn (*Crataegus sanguinea*) shoots. *Farmatsiya = Pharmacy*. 2021;70(5):22–26. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.29296/25419218-2021-05-03>
39. Kurkin V. A., Morozova T. V., Pravdivtseva O. E., Kurkina A. V., Daeva E. D., Kadentsev V. I. Constituents from Leaves of *Crataegus sanguinea*. *Chemistry of Natural Compounds*. 2019;55:21–24. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10600-019-02606-w>
40. Куркин В. А., Волкова Н. А., Правдивцева О. Е., Куркина А. В., Трифонова П. В., Дубищев А. В., Агапов А. И., Егорова С. Н. Определение содержания флавоноидов в цветках, листьях и побегах боярышника. *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии*. 2022;25(4):3–9. DOI: <https://doi.org/10.29296/25877313-2022-04-01> EDN: JZFXN
- Kurkin V. A., Volkova N. A., Pravdivtseva O. E., Kurkina A. V., Trifonova P. V., Dubishchev A. V., Agapov A. I., Egorova S. N. Determination of the flavonoid content in flowers, leaves and shoots of *Crataegus* L. *Voprosy biologicheskoy, meditsinskoy i farmatsevticheskoy khimii = Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*. 2022;25(4):3–9. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.29296/25877313-2022-04-01>
41. Medetbekova A., Kolumbayeva S., Dautbayeva S. Study of antimutagenic activity of medicinal plant infusions *Crataegus sanguinea* Pall. family *Rosaceae* in plant test systems. *BIO Web Conferences: International Scientific Forum «Modern Trends in Sustainable Development of Biological Sciences» (IFBioScFU 2024)*. 2024;100:03011. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410003011>
42. Sun J., Gao G., Gao Y. L., Xiong J., Li X., Guo J., Zhang Y. Experimental research on the in vitro antitumor effects of *Crataegus sanguinea*. *Cell Biochemistry and Biophysics*. 2013;67:207–213. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12013-013-9535-6>
43. Куркин В. А., Морозова Т. В., Шайхутдинов И. Х., Лямин А. В., Правдивцева О. Е., Первушкин С. В., Кретова А. А. Сравнительное фитохимическое и микробиологическое исследование жидких экстрактов из плодов боярышника кроваво-красного и боярышника полумягкого. *Вопросы биологической, медицинской и фармацевтической химии*. 2019;22(4):3–6. DOI: <https://doi.org/10.29296/25877313-2019-04-01> EDN: AMWPOR
- Kurkin V. A., Morozova T. V., Shaykhutdinov I. Kh., Lyamin A. V., Pravdivtseva O. E., Pervushkin S. V., Kretova A. A. The comparative phytochemical and microbiological study of liquid extracts based on the fruits of the *Crataegus sanguinea* Pall. and *Crataegus submollis* Sarg. *Voprosy biologicheskoy, meditsinskoy i farmatsevticheskoy khimii = Problems of Biological, Medical and Pharmaceutical Chemistry*. 2019;22(4):3–6. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.29296/25877313-2019-04-01>
44. Fedorova D. G., Karpova G. V., Ukenov B. S. The Accumulation of Heavy Metals in the Leaves of *Crataegus Sanguinea* Pall. (Redhaw Hawthorn) in the Urban Environment (On the Example of Orenburg). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;670:012030. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/670/1/012030>
45. Blamey M., Grey-Wilson C. *Flora of Britain and Northern Europe*. Hodder & Stoughton, 1989. 544 p.
46. La Torre C., Loizzo M. R., Frattaruolo L., Plastina P., Grisolia A., Armentano B. et al. Chemical Profile and Bioactivity of *Rubus idaeus* L. Fruits Grown in Conventional and Aeroponic Systems. *Plants*. 2024;13(8):1115. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13081115>
47. Gao X., Lin F., Li M., Mei Y., Li Y., Bai Y. et al. Prediction of the potential distribution of a raspberry (*Rubus idaeus*) in China based on MaxEnt model. *Scientific Reports*. 2024;14:24438. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75559-y>

48. Kotuła M., Kapusta-Duch J., Smoleń S., Doskočil I. Phytochemical Composition of the Fruits and Leaves of Raspberries (*Rubus idaeus* L.) – Conventional vs. Organic and Those Wild Grown. *Applied Sciences*. 2022;12(22):11783. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122211783>
49. Krauze-Baranowska M., Głód D., Kula M., Majdan M., Hałas R., Matkowski A. et al. Chemical composition and biological activity of *Rubus idaeus* shoots – a traditional herbal remedy of Eastern Europe. *BMC Complementary Medicine and Therapies*. 2014;14:480. DOI: <https://doi.org/10.1186/1472-6882-14-480>
50. Ispiryian A., Atkociuniene V., Makstutiene N., Sarkinas A., Salaseviciene A., Urbonaviciene D. et al. Correlation between Antimicrobial Activity Values and Total Phenolic Content/Antioxidant Activity in *Rubus idaeus* L. *Plants*. 2024;13(4):504. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants13040504>
51. Krauze-Baranowska M., Majdan M., Hałas R., Głód D., Kula M., Fecka I., Orzeł A. The antimicrobial activity of fruits from some cultivar varieties of *Rubus idaeus* and *Rubus occidentalis*. *Food & Function*. 2014;5:2536–2541. DOI: <https://doi.org/10.1039/C4FO00129J>
52. Četojević-Simin D. D., Velićanski A. S., Cvetković D. D., Markov S. L., Četković G. S., Šaponjac V. T. T. et al. Bioactivity of Meeker and Willamette raspberry (*Rubus idaeus* L.) pomace extracts. *Food chemistry*. 2015;166:407–413. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.06.063>
53. Markov N., Georgiev D., Georgieva M., Bozhanska T., Hristova D., Hristov M. Waste from the summer pruning of berry bushes suitable for feeding beef cattle. *Macedonian Journal of Animal Science*. 2022;12(1-2):23–28. DOI: <https://doi.org/10.54865/mjas22121-2021m>
54. Lans C., Turner N., Khan T., Brauer G., Boepple W. Ethnoveterinary medicines used for ruminants in British Columbia, Canada. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*. 2007;3:11. DOI: <https://doi.org/10.1186/1746-4269-3-11>
55. Nota G., Svensk M., Barberis D., Frund D., Pagani R., Pittarello M. et al. Foraging behavior of Highland cattle in silvopastoral systems in the Alps. *Agroforestry Systems*. 2024;98:491–505. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00926-z>
56. Агабабян Ш. М. Кормовые растения сенокосов и пастбищ СССР: в 3 т. Под ред. И. В. Ларина. М.-Л.: Сельхозгиз, 1951. Т. 2: Двудольные (Хлорантовые – Бобовые). С. 486–487.
- Agababayan Sh. M. Fodder plants of hayfields and pastures of the USSR: in 3 vol. Edited by I. V. Larina. Moscow - Leningrad: *Sel'khozgiz*, 1951. Vol. 2: Dicotyledons (Chloranthaceae – Legumes). pp. 486–487.
57. Grochowski D. M., Strawa J. W., Granica S., Tomczyk M. Secondary metabolites of *Rubus caesius* (Rosaceae). *Biochemical Systematics and Ecology*. 2020;92:104111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bse.2020.104111>
58. Dudzinska D., Bednarska K., Boncler M., Luzak B., Watala C. The influence of *Rubus idaeus* and *Rubus caesius* leaf extracts on platelet aggregation in whole blood. Cross-talk of platelets and neutrophils. *Platelets*. 2016;27(5):433–439. DOI: <https://doi.org/10.3109/09537104.2015.1131254>
59. Dudzinska D., Luzak B., Boncler M., Rywaniak J., Sosnowska D., Podsedek A., Watala C. CD39/NTPDase-1 expression and activity in human umbilical vein endothelial cells are differentially regulated by leaf extracts from *Rubus caesius* and *Rubus idaeus*. *Cellular and Molecular Biology Letters*. 2014;19(3):361–380. DOI: <https://doi.org/10.2478/s11658-014-0202-8>
60. Hering A., Stefanowicz-Hajduk J., Hałas R., Olech M., Nowak R., Kosiński P., Ochocka J. R. Polyphenolic Characterization, Antioxidant, Antihyaluronidase and Antimicrobial Activity of Young Leaves and Stem Extracts from *Rubus caesius* L. *Molecules*. 2022;27(19):6181. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27196181>
61. Schadler V., Dergatschewa S. *Rubus caesius* L. leaves: Pharmacognostic analysis and the study of hypoglycemic activity. *National Journal of Physiology, Pharmacy and Pharmacology*. 2017;7(5):501–508. DOI: <https://doi.org/10.5455/njppp.2017.7.1234224012017>
62. Topcu G. D., Koyun N. K., Korkmaz A. The Relationship Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Forage Value of *Rubus* Species Collected from Türkiye's Flora. *Sustainability*. 2024;16(21):9278. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16219278>
63. Cosyns E., Degezelle T., Demeulenaere E., Hoffmann M. Feeding ecology of Konik horses and donkeys in Belgian coastal dunes and its implications for nature management. *Belgian journal of zoology*. 2001;131(S2):111–118. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=812e5da5094aeb40935a06ac170928f7ff7fbc2d>
64. Shomurodov H., Khayitov R., Abduraimov O., Maxmudov A., Abduraimov A. Poisonous and harmful plants of pastures in the Kyzylkum desert (Uzbekistan). *E3S Web of Conferences*. 2024;539:01008. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453901008>
65. Chroho M., Bailly C., Bouissane L. Ethnobotanical Uses and Pharmacological Activities of Moroccan *Ephedra* Species. *Planta medica*. 2024;90(05):336–352. DOI: <https://doi.org/10.1055/a-2269-2113>
66. Dousari A. S., Satarzadeh N., Amirheidari B., Forootanfar H. Medicinal and Therapeutic Properties of *Ephedra*. *Revista Brasileira de Farmacognosia*. 2022;32:883–899. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43450-022-00304-3>
67. Ibragic S., Sofic E. Chemical composition of various *Ephedra* species. *Biomolecules Biomed*. 2015;15(3):21–27. DOI: <https://doi.org/10.17305/bjbm.2015.539>
68. Nurushev M., Nurusheva A., Baibagyssov A. The Role of Climate Change in the Dynamics of the Kazakhstan Population of *Saiga* (*Saiga tatarica* L.). *Global Ecology and Biogeography*. 2022;5(1):146–153. DOI: <https://doi.org/10.17352/gje.000034>
69. Sen Z., Qing C., Keremu A., Shanhui L., Yongjun Z., Defu H. Food patch particularity and forging strategy of reintroduced Przewalski's horse in North Xinjiang, China. *Turkish Journal of Zoology*. 2017;41:924–930. DOI: <https://doi.org/10.3906/zoo-1509-9>

70. Gheibipour M., Ghiasi S. E., Bashtani M., Torbati M. B. M., Motamedi H. The potential of tannin degrading bacteria isolated from rumen of Iranian Urial ram as silage additives. *Bioresource Technology Reports*. 2022;18:101024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101024>
71. Тимофеев Н. П. Фитобиотики в мировой практике: виды растений и действующие вещества, эффективность и ограничения, перспективы (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2021;22(6):804–825. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.6.804-825> EDN: SZRHZL
- Timofeev N. P. Phytobiotics in world practice: plant species and active substances, efficiency and limitations, perspectives (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2021;22(6):804–825. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.6.804-825>
72. Twaij B. M., Hasan M. N. Bioactive secondary metabolites from plant sources: types, synthesis, and their therapeutic uses. *International Journal of Plant Biology*. 2022;13(1):4–14. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijpb13010003>
73. Aljohani A. Botanical Compounds: A Promising Approach to Control Mycobacterium Species of Veterinary and Zoonotic Importance. *Pakistan veterinary journal*. 2023;43(4):633–642. DOI: <http://dx.doi.org/10.29261/pakvetj/2023.107>
74. Auezov G. A. M., Pernebekova R., Auezov N. S. M., Uzakovich Z. K., Rakhmonov T., Azamatovna T. K. et al. Comparative analysis of antimicrobial properties of medicinal plants used in veterinary medicine. *Caspian journal of environmental sciences*. 2024;22:1043–1053. URL: https://cjes.guilan.ac.ir/article_8071_4fb5ab1d48fab6d8f50679265de08179.pdf
75. Faehnrich B., Franz C., Nemaz P., Kaul H. P. Medicinal plants and their secondary metabolites – State of the art and trends in breeding, analytics and use in feed supplementation – With special focus on German chamomile. *Journal of Applied Botany and Food Quality*. 2021;94:6174. DOI: <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2021.094.008>
76. Samadov B. S., Jalilova F. S., Jalilov F. S. Analysis of the components of the collection of medicinal plant raw materials of *Momordica Charantia* L. *Scientific progress*. 2022;3:49–57. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analysis-of-the-components-of-the-collection-of-medicinal-plant-raw-materials-of-momordica-charantia-l>
77. Csepregi R., Temesfői V., Das S., Alberti Á., Tóth C. A., Herczeg R. et al. Cytotoxic, antimicrobial, antioxidant properties and effects on cell migration of phenolic compounds of selected transylvanian medicinal plants. *Antioxidants*. 2020;9(2):166. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox9020166>
78. Okaiyeto K., Oguntibeju O. O. African herbal medicines: Adverse effects and cytotoxic potentials with different therapeutic applications. *International journal of environmental research and public health*. 2021;18(11):5988. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18115988>
79. Nwozo O. S., Effiong E. M., Aja P. M., Awuchi C. G. Antioxidant, phytochemical, and therapeutic properties of medicinal plants: A review. *International Journal of Food Properties*. 2023;26(1):359–388. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942912.2022.2157425>
80. Faehnrich B., Lukas B., Humer E., Zebeli Q. Phytogetic pigments in animal nutrition: potentials and risks. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2016;96(5):1420–1430. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.7478>

Сведения об авторах

Инчагова Ксения Сергеевна, кандидат биол. наук, научный сотрудник лаборатории селекционно-генетических исследований в животноводстве, ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук», ул. 9 Января д. 29, г. Оренбург, Оренбургская область, Российская Федерация, 460000, e-mail: fnbst@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1111-8293>

✉ **Вершинина Ирина Александровна**, кандидат биол. наук, научный сотрудник отдела технологии зерновых и кормовых культур, ФГБНУ «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук», ул. 9 Января д. 29, г. Оренбург, Оренбургская область, Российская Федерация, 460000, e-mail: fnbst@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9377-7673>, e-mail: gavrish.irina.ogu@gmail.com

Information about the authors

Kseniya S. Inchagova, PhD in Biological Science, researcher, the Laboratory of Breeding and Genetic Research in Animal Husbandry, Federal Research Centre of Biological Systems and Agro-technologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Janvarya St., Orenburg, Orenburg Region, Russian Federation, 460000, e-mail: fnbst@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1111-8293>

✉ **Irina A. Vershinina**, PhD in Biological Science, researcher, the Department of Grain and Forage Crops Technology, Federal Research Centre of Biological Systems and Agro-technologies of the Russian Academy of Sciences, 29, 9 Janvarya St., Orenburg, Orenburg Region, Russian Federation, 460000, e-mail: fnbst@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9377-7673>, e-mail: gavrish.irina.ogu@gmail.com

✉ – Для контактов / Corresponding author

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.749-759>

УДК 633.14:631.524.84(470.342)

**Анализ адаптивного и продуктивного потенциала сортов озимой ржи вятской селекции**

© 2025. Е. С. Парфенова✉, Е. А. Псарева

ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», г. Киров, Российская Федерация

Изучение структуры урожая сортов озимой ржи в конкурсном сортоиспытании позволяет оценить результаты селекции и скорректировать направления отбора. В условиях Кировской области (2022–2024 гг.) изучали структуру урожая 13 районированных и перспективных сортов озимой ржи (*Secale cereale* L. var. *vulgare* Koern.) в полевом опыте. Анализ признаков проводили с применением метода главных компонент с биplot-визуализацией. Метод главных компонент на основе анализа корреляционной матрицы выявляет причины изменчивости урожайности. Величина факторных нагрузок показала неодинаковый вклад признаков в увеличение урожайности в разных погодных условиях. Признаки «зимостойкость» и «высота растений» оказали положительное влияние на продуктивный потенциал сортов как во влажных, так и в засушливых условиях весенне-летней вегетации, «количество колосков в колосе» – только при благоприятных условиях и отсутствии конкуренции в ценозе. Структура факторов изменялась при смене условий среды. Первый фактор (адаптивности) объяснял 31,5–53,3 % дисперсии урожайности за счет зимостойкости при достаточном увлажнении летней вегетации (2022, 2023 гг.) и за счет высоты растений при засухе в 2024 г. (факторные нагрузки 0,83–0,94 и 0,80 соответственно). Второй фактор с неустойчивой структурой объяснял 16,0–25,4 % дисперсии урожайности за счет количества колосков в колосе и поражения снежной плесенью (факторные нагрузки 0,80 и 0,83 соответственно). Достоверно высокая урожайность в опыте получена у сортов Ли́ка (4,97 т/га), Батист (4,92 т/га), Графиня (4,88 т/га) при показателе стандарта Фаленская 4 – 4,55 т/га ($HCP_{05} = 0,24$). Значимый вклад в формирование урожайности сортов Ли́ка и Батист внесли признаки «зимостойкость» и «высота растений», сорта Графиня – «количество колосков в колосе». Высокая урожайность формировалась при различном вкладе признаков адаптивности и продуктивности. Селекция озимой ржи в условиях Кировской области должна быть направлена на повышение продуктивности.

Ключевые слова: *Secale cereale* L., селекция, метод главных компонент, факторная нагрузка, урожайность, структура урожая

Благодарности: работа выполнена в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (тема № FNWE-2025-0010).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Парфенова Е. С., Псарева Е. А. Анализ адаптивного и продуктивного потенциала сортов озимой ржи вятской селекции. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(4):749–759.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.749-759>

Поступила: 11.04.2025

Принята к публикации: 24.07.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

Analysis of the adaptive and productive potential of winter rye cultivars of Vyatka breeding

© 2025. Elena S. Parfenova✉, Ekaterina A. Psareva

Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Kirov, Russian Federation

Study of the yield structure of winter rye cultivars in competitive variety testing makes it possible to evaluate the results of breeding and adjust the selection directions. In the conditions of the Kirov region (2022–2024), the yield structure of 13 zoned and promising cultivars of winter rye (*Secale cereale* L. var. *vulgare* Koern.) was studied in a field experiment. The analysis of the traits was carried out using the principal component analysis with biplot visualization. The principal component analysis based on the analysis of the correlation matrix reveals the causes of yield variability. The magnitude of the factor loadings showed an unequal contribution of traits to the increase in yield in different weather conditions. The traits “winter hardiness” and “plant height” had a positive effect on the productive potential of cultivars in both wet and dry conditions of the spring-summer vegetation period, “number of spikelets per ear” – only under favorable conditions and the absence of competition in the cenosis. The structure of factors changed with changing environmental conditions. The first factor (adaptability) explained 31.5–53.3 % of the yield variance due to winter hardiness with sufficient moisture during the summer growing season (2022, 2023) and due to plant height during drought in 2024 (factor loadings of 0.83–0.94 and 0.80,

respectively). The second factor with an unstable structure explained 16.0–25.4 % of the yield variance due to the number of spikelets per ear and snow mold damage (factor loadings of 0.80 and 0.83, respectively). Reliably high yields in the experiment were obtained from the 'Lika' (4.97 t/ha), 'Batist' (4.92 t/ha), and 'Grafinya' (4.88 t/ha) cultivars, with the 'Falenskaya 4' standard indicator of 4.55 t/ha ($LSD_{05} = 0.24$). The traits "winter hardiness" and "plant height" made a significant contribution to the formation of the yield of the 'Lika' and 'Batist' cultivars and the "number of spikelets per ear" of the 'Grafinya' cultivars. High yields are formed with different contributions of adaptability and productivity traits. Breeding of winter rye in the conditions of the Kirov region should be aimed at increasing productivity.

Keywords: *Secale cereale* L., breeding, method of principal components, factor loading, yield, yield structure

Acknowledgments: the work 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 Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (theme No. FNWE-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: Parfenova E. S., Psareva E. A. Analysis of the adaptive and productive potential of winter rye cultivars of Vyatka breeding. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):749–759. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.749-759>

Received: 11.04.2025

Accepted for publication: 24.07.2025

Published online: 29.08.2025

Актуальной задачей селекции озимой ржи (*Secale cereale* L. var. *vulgare* Koern.) является повышение экологической устойчивости сортов для реализации их потенциальной продуктивности. Особенно важна адаптация сортов к региональным экологическим стрессовым факторам [1, 2]. Для озимой ржи в Волго-Вятском регионе основными экологическими неблагоприятными факторами являются суровые условия перезимовки, провоцирующие гибель растений от поражения снежной плесенью (*Microdochium nivale* (Fr.) Samuels et Hallett), и эдафический стресс. На величину и стабильность урожайности озимой ржи в регионе влияют климатические изменения последних десятилетий, которые выражаются в увеличении сумм активных и эффективных температур, осадков, частоты осенних и летних засух, удлинении периода осенней вегетации озимых культур [3, 4]. Дополнительным негативным фактором, влияющим на урожайность озимой ржи, является полегание, способное снизить урожай на 25–80 % в зависимости от фазы развития растений [5, 6]. Вегетационный период озимой ржи, по сравнению с яровыми зерновыми культурами, более длительный (от 270 до 350 дней), и формирование урожая этой культуры зависит от большего количества агрометеорологических факторов в осенне-зимний и весенне-летний периоды. Изучение структуры урожая озимой ржи в различных погодных условиях позволяет выявить общие и сортоспецифические закономерности формирования урожайности [7]. Структура урожая озимой ржи представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных признаков на уровне колоса, растения и ценоза, определяющий

величину урожайности сорта. Для анализа многомерных совокупностей признаков в селекционных и биологических исследованиях применяется метод главных компонент, который основан на анализе корреляционной матрицы и позволяет выявить скрытые от непосредственного наблюдения действующие факторы в совокупности признаков [8, 9, 10]. С помощью данного метода также можно выделить наиболее информативные признаки и классифицировать изучаемые объекты [11, 12]. Главные компоненты представляют собой некоторые интегральные характеристики («новые» признаки), образованные комбинацией исходных признаков и отражающие определенные биологические закономерности [13].

Результаты конкурсного сортоиспытания, как завершающего этапа селекционного процесса, дают полную агробиологическую характеристику сорта в широком диапазоне погодных условий. Анализ изменчивости и взаимосвязей признаков, участвующих в формировании урожая сортов озимой ржи, необходим для выявления «слабых мест» в селекционной работе, корректировки направлений отбора и повышения эффективности селекции.

Цель исследований – оценить сорта озимой ржи по комплексу признаков в различных погодных условиях вегетационного периода, выявить вклад факторов и агробиологических признаков в изменчивость урожайности для повышения эффективности селекционной работы.

Научная новизна – с помощью метода главных компонент установлены факторы и признаки, определяющие урожайность сортов озимой ржи селекции ФГБНУ ФАНЦ Северо-

Востока в конкурсном сортоиспытании в разных погодных условиях; выделены группы сортов с разной реакцией на изменение условий среды.

Материал и методы. Исследования проводили на 13 сортах озимой ржи (*Secale cereale* L. var. *vulgare* Koern.) среднепоздней группы спелости селекции ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого». Сорта изучали в питомнике конкурсного сортоиспытания на опытном поле ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока (центральная агроклиматическая зона Кировской области, северо-восток Волго-Вятского региона) в 2022–2024 гг. (стандарт – сорт Фаленская 4). Повторность опыта четырехкратная, учетная площадь делянки 10 м², способ посева рядовой с шириной междурядий 15 см, норма высева 6 млн всхожих семян на 1 га.

Почва опытного участка – дерново-подзолистая тяжелосуглинистая, рН_{KCl} – 4,0¹, содержание гумуса – 1,37 %², подвижного фосфора – 190 мг/кг, обменного калия – 221 мг/кг почвы³. Агротехника в опыте – принятая для центральной зоны Кировской области. Предшественник – чистый пар. Изучение сортов по комплексу хозяйственно ценных признаков проводили в соответствии с методикой⁴, в оценке уровней развития признаков использовали классификацию⁵. Гидротермический коэффициент (ГТК) определяли по формуле Г. Т. Селянинова⁶ с использованием данных интернет-ресурса⁷. Статистическую обработку данных урожайности проводили методом двухфакторного дисперсионного анализа с использованием пакета программ AGROS 2.07 (уровень значимости $p \leq 0,05$), анализ структуры корреляций – методом главных компонент⁸ в программе XLSTAT 2016.02.28451 по 9 признакам (для расчета использовали коэффициент ран-

говой корреляции Спирмена). Количество значимых главных компонент выделяли по критерию Кайзера (с собственным значением больше 1,0).

Основными агрометеорологическими факторами, определяющими урожайность озимой ржи в Кировской области, являются условия перезимовки и количество влаги в критические периоды водопотребления растений (всходы, кущение, выход в трубку, колошение, цветение, налив зерна). Условия перезимовки (высокий снеговой покров, зимние оттепели) ежегодно провоцировали выпревание растений из-за поражения снежной плесенью (*M. nivale* (Fr.) Sam. et Hall.). Степень поражения сортов была высокой – в среднем 92–95 %. В период «всходы – осеннее кущение» отмечены засушливые условия для посевов под урожай 2024 г. (ГТК = 0,14). Осенняя вегетация посевов под урожай 2022 и 2023 гг. проходила в условиях избытка осадков и недостатка тепла в сентябре (средняя температура воздуха за месяц составила 7,3 и 9,0 °С, количество осадков – 141 и 145 % от нормы соответственно). Большое значение для формирования продуктивности озимой ржи имеют погодные условия в период возобновления вегетации растений и в фазу «выход в трубку». Наиболее благоприятной в этом отношении была весна 2023 г. (сход снега раньше на 10–15 дней, средняя температура апреля выше нормы на 2,7 °С). В 2022 г. условия весны сложились на уровне средне-многолетних показателей (сход снега в последней декаде апреля). В 2024 г. отмечали аномальные условия (сильное длительное похолодание со средней температурой воздуха в мае ниже нормы на 4,5 °С и установлением снежного покрова в первой декаде мая).

¹ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1985. 6 с.

URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/738/4294827946.pdf>

²ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. Определение органического вещества по методу Тюрина в модификации ЦИНАО. М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1992. 8 с.

URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/f09/4294828267.pdf>

³ГОСТ Р 54650-2011. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. М.: Стандартинформ, 2013. 11 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/32d/4293788445.pdf>

⁴Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. М., 1989. Вып. 2. 194 с.

⁵Международный классификатор СЭВ рода *Secale* L. Л.: ВИР, 1984. 20 с.

⁶Селянинов Г. Т. О сельскохозяйственной оценке климата. Труды по сельскохозяйственной метеорологии. 1928;20:165–177.

⁷Погода и климат. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=27199&month=8&year=2022> (дата обращения: 04.02.2025).

⁸Кулаичев А. П. Методы и средства комплексного анализа данных. М., 2006. С. 315–350. [Электронный ресурс]. URL: <http://protein.bio.msu.ru/~akula/didFA/DidFA.htm> (дата обращения: 04.02.2025).

В фазу «выход в трубку» (май) в 2022 г. прохладная влажная погода была благоприятной для ржи, в 2023 г. недостаток осадков не оказал отрицательного влияния на рост и развитие растений. В 2024 г. в условиях дефицита тепла в фазу «выход в трубку» рост растений замедлился, но резкое потепление в последней декаде мая ускорило переход растений к фазе «колошение». В фазы «колошение» и «цветение» в июне увлажнение было избыточным в 2022 г. (ГТК = 2,44) и недостаточным – в 2023 и 2024 гг. (ГТК – 0,71 и 0,56 соответственно). Налив и созревание зерна (июль) проходили при избыточном увлажнении в 2022-2023 гг. (ГТК – 2,10 и 3,12 соответственно) и в засушливых условиях 2024 г. (ГТК = 0,67). В 2023 г. в период созревания зерна (в июле) частые ливневые дожди с сильным ветром (сумма осадков 220 % от нормы) спровоцировали полегание растений. Таким образом, сравнительно благоприятные агрометеорологические условия для

роста и развития озимой ржи сложились в 2022 и 2023 гг., крайне неблагоприятными условиями отличился 2024 г. (наибольшее поражение снежной плесенью (*M. nivale* (Fr.) Sam. et Hall.), летняя засуха).

Результаты и их обсуждение. Урожайность сортов озимой ржи в конкурсном сортоиспытании варьировала под влиянием генотипа сорта, погодных условий года и взаимодействия этих факторов. Статистически значимое влияние условий среды и взаимодействия генотипа со средой показывает недостаточно высокий адаптивный потенциал сортов, что проявляется в варьировании урожайности по годам и уменьшает стабильность продуктивности генотипов. Урожайность в среднем по сортам была достоверно выше в годы с достаточной влагообеспеченностью весенне-летней вегетации (2022 и 2023 гг.) по сравнению с засушливым 2024 г. (табл. 1).

Таблица 1 – Влияние генотипа и условий года на урожайность сортов озимой ржи, т/га /
 Table 1 – Influence of genotype and year conditions on yield of winter rye cultivars, t/ha

Сорт (фактор А) / Cultivar (factor A)	Год (фактор В) / Year (factor B)			Среднее (сорт) / Average (cultivar)
	2022 г.	2023 г.	2024 г.	
Фаленская 4, стандарт / 'Falenskaya' 4, standard	4,47	5,01	4,17	4,55
Лика / 'Lika'	5,16*	5,44*	4,30	4,97*
Батист / 'Batist'	5,12*	5,53*	4,11	4,92*
Графиня / 'Grafinya'	5,47*	5,49*	3,69	4,88*
Перепел / 'Perepel'	4,96*	5,10	3,54	4,53
Флора / 'Flora'	4,40	4,94	4,23	4,52
Графит ФП / 'Grafit FP'	4,61	4,74	3,71	4,35
Талица / 'Talitsa'	5,13*	4,11	3,57	4,27*
Графит / 'Grafit'	4,14	4,77	3,89	4,27*
Рушник / 'Rushnik'	4,58	4,82	3,19	4,20*
Фаленская универсальная / 'Falenskaya universalnaya'	4,94*	4,47	3,15	4,19*
Вятка 2 / 'Vyatka 2'	4,09	4,17	3,80	4,02*
Гармония / 'Garmoniya'	3,62	4,89	3,14	3,88*
Среднее по опыту / Average by the experiment	4,43			
Среднее (год) / Average (year)	4,67*	4,88*	3,73	-
HCP ₀₅ (сорт) / LSD ₀₅ (cultivar)	-			0,24
HCP ₀₅ (год) / LSD ₀₅ (year)	0,11			-
HCP ₀₅ (сорт x год) / LSD ₀₅ (cultivar x year)	0,41			

* Различия по сравнению с сортом-стандартом статистически значимы при $p \leq 0,05$ /

* Differences compared to the standard cultivar are statistically significant at $p \leq 0.05$

Достоверные сортовые различия по урожайности показывают наличие генотипического разнообразия. По усредненным данным, в сравнении со стандартом, выделены сорта с достоверно высокой урожайностью (Лика, Батист, Графиня), сорта на уровне стандарта (Перепел, Флора, Графит ФП), сорта с достоверно низкой урожайностью (Талица, Графит, Рушник, Фаленская универсальная, Вятка 2, Гармония). К высокоурожайным отнесены новые районированные сорта, к средне- и низкоурожайным – как районированные сорта ранних сроков селекции (Вятка 2, Рушник, Флора), так и новые селекционные популяции (Талица, Гармония, Графит, Графит ФП). Такое разделение демонстрирует, с одной стороны, возможности селекции, а с другой – необходимость повышения продуктивного потенциала селекционного материала. Варьирование урожайности каждого сорта по годам обусловлено взаимодействием генотипа и среды. Сорта Флора и Графит стабильно формировали урожайность на уровне стандарта в благоприятных и засушливых условиях, Графиня и Перепел достоверно превосходили стандарт (либо не уступали) в благоприятных условиях, но уступали стандарту на фоне дефицита влаги. Сорта Талица, Фаленская универсальная отличались сильными колебаниями урожайности, Вятка 2 и Рушник, в основном, формировали урожайность на уровне стандарта, Вятка 2 был более урожайным в засушливых условиях. Сорт Гармония характеризовался низкой урожайностью во все годы изучения. В целом отмечено, что условия 2022 и 2023 гг. в большей мере способствовали проявлению продуктивного потенциала сортов, в неблагоприятных условиях 2024 г. проявились адаптивные возможности генотипов. Трехлетнее изучение в широком диапазоне погодных условий в достаточной мере выявило норму реакции генотипов, что позволило получить агробиологическую характеристику сортов (табл. 2).

Сорта отличались достаточно высокой выравненностью агробиологических показателей. Пониженные значения массы зерна с колоса и массы 1000 зерен (согласно классификатору рода *Secale* L. – менее 2,1 г и 32,0 г соответственно, а также по сравнению с сортами инорайонной селекции) у сортов указывают на необходимость усиления селекционной работы в этом направлении, так как, во-первых, эти признаки являются резервом увеличения

потенциала продуктивности, во-вторых, с крупностью зерна связаны технологические качества. Большинство урожайных сортов (с показателем выше или на уровне стандарта) характеризовались более высокими показателями зимостойкости и густоты продуктивного стеблестоя по сравнению с сортами, уступившими стандарту по урожайности. По сравнению с зимостойкими сортами (Фаленская 4, Вятка 2, Флора, Лика, Батист, Рушник) менее зимостойкие сорта (Графит ФП, Графит, Фаленская универсальная, Талица, Гармония) отличались более разреженным стеблестоем, лучшей устойчивостью к полеганию, сравнительно большей массой зерна с колоса и массой 1000 зерен.

В результате анализа корреляционной матрицы с помощью метода главных компонент выделено от 3 до 4 главных компонент (в зависимости от года), которые объясняли 79,8–83,9 % накопленной дисперсии признаков. Признаки, относящиеся к одной компоненте, связаны между собой положительно при одинаковом знаке факторных нагрузок и отрицательно – при разных знаках факторных нагрузок. Главные компоненты, объясняющие основную часть дисперсии признаков, выбираются в качестве факторов. Чем больше значение факторной нагрузки признака (по модулю), тем теснее признак связан с данным фактором (табл. 3).

В 2022 г. на фоне нормальных условий перезимовки, избыточного увлажнения летней вегетации и слабого полегания основную часть общей дисперсии объясняли 4 фактора. Первый фактор (31,5 % изменчивости урожайности) имел наибольшую факторную нагрузку с зимостойкостью. Фактор выявил положительное влияние активного весеннего отрастания и роста растений в высоту на урожайность. Второй фактор (25,4 % изменчивости урожайности) имел наибольшую факторную нагрузку с количеством колосков в колосе и массой зерна с колоса. Фактор показал положительное влияние увеличения количества колосков в колосе и массы зерна с колоса на урожайность. Поражение снежной плесенью снижало урожайность из-за гибели побегов кущения, а также уменьшения количества колосков в колосе. Взаимная независимость первого и второго факторов указывает на отсутствие конкуренции между растениями в агрофитоценозе.

Таблица 2 – Агробиологические показатели сортов озимой ржи (среднее за 2022–2024 гг.) /
Table 2 – Agrobiological indicators of winter rye cultivars (average for 2022–2024)

Сорт / Cultivar	Зимостой- кость, балл / Winter hardi- ness, point	Поражение снежной плесенью, % / Snow mold infestation, %	Густота продуктивного стеблестоя, шт/м ² / Productive stem density, pcs/m ²	Высота растений, см / Plant height, cm	Устойчивость к полеганию, балл / Lodging resistance, point	Количество колосков в колосе, шт. / Number of spikelets per ear, pcs.	Масса зерна с колоса, г / Grain weight from the ear, g	Масса 1000 зерен, г / 1000 grain weight, g	Натура зерна, г/л / Grain-unit, g/l
Фаленская 4, стандарт / ‘Falenskaya 4’, standard	4,4	92	373	138	4,1	33	1,44	27,3	710
Лика / ‘Lika’	4,8	92	446	132	3,9	34	1,43	27,2	700
Багист / ‘Batist’	4,7	93	461	135	3,9	35	1,47	27,7	702
Флора / ‘Flora’	4,7	92	435	135	4,0	32	1,57	28,0	712
Вятка / ‘Vyatka 2’	4,7	90	389	170	2,8	31	1,27	28,5	703
Ружник / ‘Rushnik’	4,6	93	428	134	3,9	32	1,48	28,8	694
Графиня / ‘Gräfinya’	4,5	97	318	136	4,4	36	1,91	29,4	703
Перепел / ‘Perepel’	4,4	96	474	131	4,5	35	1,74	29,5	702
Талица / ‘Talitsa’	4,2	88	403	137	4,1	37	1,87	29,8	693
Графит ФП / ‘Grafit FP’	4,2	98	382	129	4,6	34	1,69	29,3	707
Фаленская универсальная / ‘Falenskaya universalnaya’	4,0	85	317	128	4,5	36	1,93	31,1	725
Графит / ‘Grafit’	3,8	99	402	128	4,4	35	1,65	29,0	702
Гармония / ‘Garmoniya’	3,7	100	348	127	4,3	33	1,68	29,0	695
Среднее по опыту / Average for the experiment	4,4	94	398	135	4,1	34	1,63	28,8	704
Коэффициент вариации, % / Coefficient of variation, %	8	5	13	8	11	5	13	4	1

Таблица 3 – Величина факторных нагрузок главных компонент /
 Table 3 – Value of factor loadings of principal components

Признак / Trait	Главные компоненты / Principal components										
	2022 г.				2023 г.			2024 г.			
	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	4
Урожайность / Yield	0,69	0,64	0,07	0,18	0,28	0,79	-0,36	0,78	0,42	0,25	0,12
Поражение снежной плесенью / Snow mold infestation	-0,61	-0,55	-0,20	-0,33	-0,64	0,51	-0,05	-0,26	0,83	-0,01	0,20
Зимостойкость / Winter hardiness	0,83	-0,22	-0,14	-0,20	0,94	0,14	0,05	0,55	-0,62	0,26	-0,25
Густота продуктивного стеблестоя / Productive stem density	-0,20	0,40	-0,81	-0,17	0,87	0,20	0,05	0,44	-0,20	0,81	0,05
Высота растений / Plant height	0,78	-0,28	-0,11	0,30	0,76	-0,09	0,42	0,80	-0,30	-0,16	0,25
Устойчивость к полеганию / Lodging resistance	-0,77	0,53	0,19	0,06	-0,77	0,51	0,10	-0,43	0,30	0,69	0,08
Количество колосков в колосе / Number of spikelets per ear	0,25	0,80	-0,16	0,08	-0,78	-0,06	-0,31	-0,79	-0,32	0,31	0,13
Масса 1000 зерен / 1000 grain weight	-0,46	-0,17	0,17	0,80	-0,75	-0,25	0,41	-0,74	-0,43	-0,18	-0,06
Масса зерна с колоса / Grain weight from the ear	-0,19	0,77	0,35	-0,25	-0,88	-0,21	-0,02	-0,64	-0,28	0,11	0,63
Натура зерна / Grain-unit	0,25	-0,13	0,81	-0,32	-0,31	0,53	0,69	0,49	-0,16	-0,18	0,77
Доля общей дисперсии, % / Proportion of total variance, %	31,45	25,40	15,89	11,19	53,30	16,00	10,54	38,14	18,62	14,58	11,91
Накопленная дисперсия, % / Cumulative of variance, %	31,45	56,84	72,73	83,91	53,30	69,30	79,84	38,14	56,76	71,34	83,25

Примечание: выделены жирным шрифтом статистически значимые факторные нагрузки с величиной $\geq 0,55$ (уровень значимости $p \leq 0,05$, количество наблюдений 13) /

Note: statistically significant factor loadings with a value ≥ 0.55 (significance level $p \leq 0.05$, number of observations 13) are highlighted in bold.

Натура зерна и густота продуктивного стеблестоя объясняли 15,9 % изменчивости урожайности в третьем факторе (разные знаки факторных нагрузок означают, что лучшие условия для налива зерна сложились в разреженном стеблестое). Количество колосьев на 1 м² ко времени уборки зависело от условий летней вегетации (густота продуктивного стеблестоя и зимостойкость имели значимые нагрузки на разные факторы). В четвертом факторе масса 1000 зерен объясняла 11,2 % изменчивости урожайности (небольшая доля объясненной дисперсии связана с невысоким значением массы 1000 зерен у сортов).

В 2023 г. на фоне более сильного полегания посевов в фазу «созревание зерна» большую часть общей дисперсии объясняли 3 фактора. Первый фактор с максимальной факторной нагрузкой зимостойкости объяснял 53,3 % изменчивости урожайности и выявил усиление конкуренции между растениями

в агрофитоценозе при увеличении густоты и высоты стеблестоя. Разреженные, короткостебельные и устойчивые к полеганию посевы формировали более крупное зерно (в исследовании [14] также получены данные о снижении массы 1000 зерен в посевах, полегших после цветения). Увеличение высоты растений и густоты продуктивного стеблестоя способствовало полеганию посевов (отрицательная связь между этими признаками выявлена в работе [15]). Урожайность во втором факторе объясняла 16 % дисперсии. Отсутствие значимых нагрузок других признаков в этом факторе показывает, что урожайность формировалась за счет всего комплекса признаков, без выраженного влияния отдельных. Кроме того, независимость первого и второго факторов также подтверждает, что высокая урожайность формировалась при сочетании различной величины устойчивости к полеганию, зимостойкости, поражения снежной плесенью, густоты про-

дуктивного стеблестоя, высоты растений и признаков колоса. Позднее полегание не влияло значимо на урожайность. Натура зерна объясняла 10,5 % изменчивости урожайности в третьем факторе.

В 2024 г. на фоне более сильного поражения снежной плесенью и в засушливых условиях летней вегетации большую часть общей дисперсии объясняли 4 фактора. Первый фактор с наибольшей факторной нагрузкой признака высоты растений определил 38,1 % изменчивости урожайности. В условиях летней засухи высокую урожайность сформировали сорта, которые лучше перезимовали и эффективно использовали весенние запасы почвенной влаги для роста стебля. Вероятно, зимостойкие сорта, обладающие способностью к активному весеннему отрастанию, также являются более засухоустойчивыми. Высокорослые сорта имели меньшую продуктивность колоса и крупность зерна, что являлось их адаптивной реакцией на дефицит влаги. Второй фактор с максимальной факторной нагрузкой на поражение снежной плесенью обусловил 18,6 % изменчивости урожайности. Выделение признака поражения снежной плесенью в отдельный фактор указывает на более сильное поражение патогеном в данном году. Густота продуктивного стеблестоя объясняла 14,6 % изменчивости урожайности в третьем факторе (устойчивость к полеганию была выше у сортов с более густым стеблестоем). Отсутствие связи между зимостойкостью и густотой продуктивного стеблестоя в засушливых условиях можно объяснить отмиранием побегов у растений в течение вегетации из-за дефицита влаги. Натура зерна объяснила 11,9 % изменчивости урожайности в четвертом факторе (при дефиците влаги более выполненным было мелкое зерно).

Таким образом, агрономические признаки (колоса и зерна) и биологические, характеризующие ценоз, вносили в дисперсию урожайности разнонаправленные вклады. Эти группы признаков разделялись на разные факторы или сочетались в одном факторе с разными знаками факторных нагрузок, что свидетельствует о конкуренции между растениями в ценозе. Увеличению урожайности сортов способствовали зимостойкость, высота растений и количество колосков в колосе. При этом зимостойкость и высота растений положительно влияли на урожайность при достаточном увлажнении и засухе. Количество колосков в колосе увели-

чивало урожайность только при отсутствии конкуренции в агрофитоценозе, когда признаки колоса и ценоза имели значимые нагрузки на разные факторы. При наличии конкуренции в агрофитоценозе, вызванной полеганием (2023 г.) и летней засухой (2024 г.), увеличение количества колосков в колосе (и, значит, массы зерна с колоса) было сопряжено с меньшей зимостойкостью и плотностью стеблестоя, что привело к снижению урожайности. Поражение снежной плесенью уменьшало продуктивный потенциал сортов в связи со снижением плотности стеблестоя и продуктивности колоса.

Визуализация результатов анализа структуры изменчивости методом главных компонент в виде биplot-графика наглядно отражает сортовые особенности формирования урожайности. Биplot показывает расположение сортов и признаков в пространстве двух факторов, объясняющих наибольшую долю общей дисперсии (рис.). Расположение сорта на биплоте показывает, насколько выражен у сорта отдельный признак или фактор. Чем длиннее и ближе вектор признака к факторной оси, тем сравнительно более весомо этот признак представлен в факторе.

В условиях разных лет первый фактор («фактор адаптивности») разделил сорта на две контрастные группы по вкладу зимостойкости и связанных с ней признаков в формирование урожайности. Для сортов с положительными координатами первого фактора урожайность определялась высокой зимостойкостью и выносливостью к снежной плесени, длинностебельностью и склонностью к полеганию, и соответственно меньшими значениями признаков колоса и массы 1000 зерен. Урожайность сортов с отрицательными координатами первого фактора определялась меньшей зимостойкостью и высотой растений, более сильным поражением снежной плесенью, меньшей плотностью стеблестоя, устойчивостью к полеганию, высокой продуктивностью колоса. Положительные координаты первого фактора имели сорта Фаленская 4, Вятка 2, Лика, Батист; отрицательные координаты первого фактора отмечены у сортов Перепел, Графит, Графит ФП, Гармония. Выявлены сорта Графиня, Флора, Рушник, Талица, Фаленская универсальная с сильным эффектом взаимодействия «генотип x среда». Отзывчивость таких сортов на изменение условий среды проявлялась в смене факторных координат на биплоте.

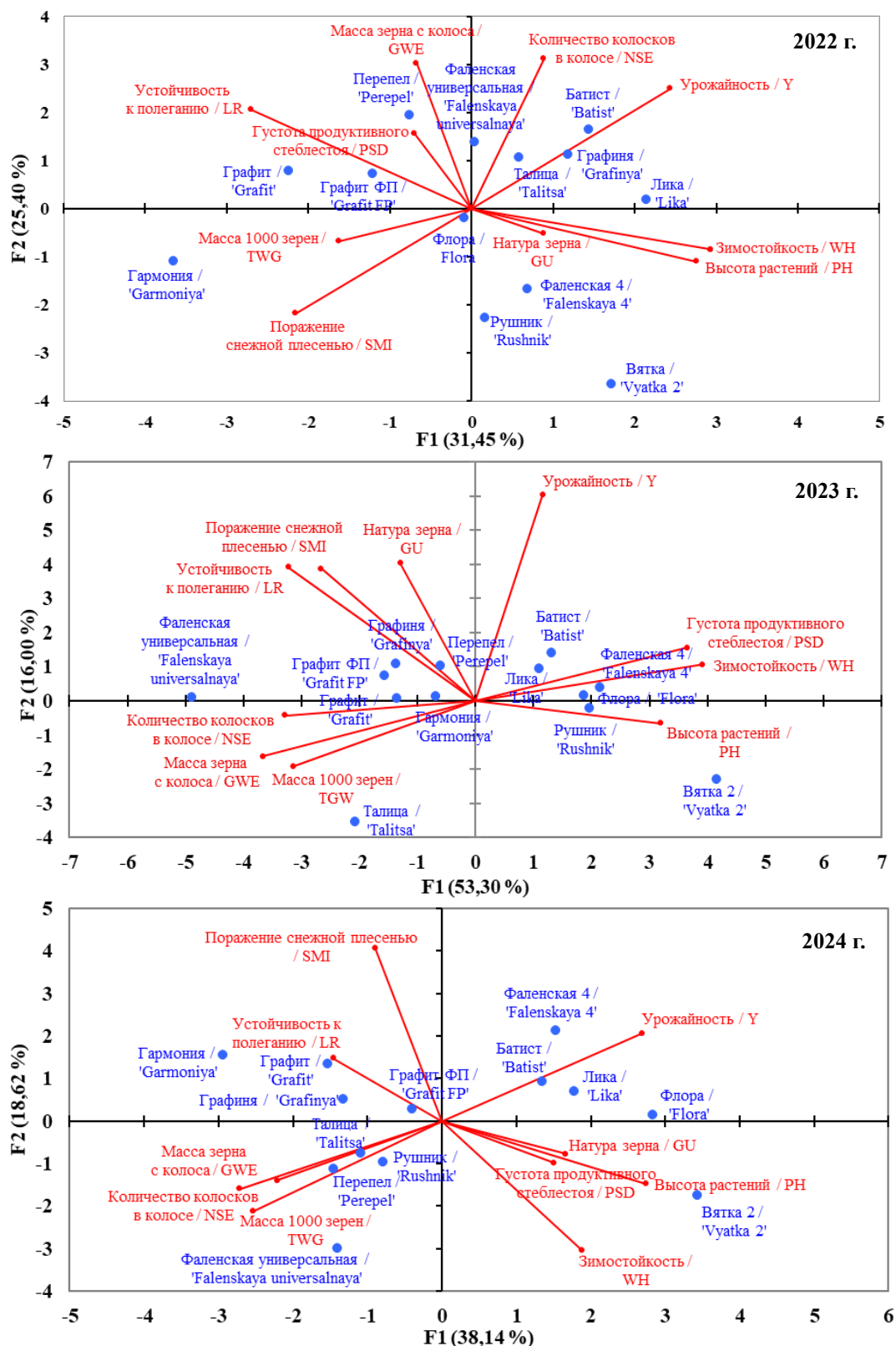


Рис. Расположение сортов и признаков озимой ржи на плоскости факторов: урожайность; густота продуктивного стеблестоя; зимостойкость; устойчивость к полеганию; количество колосков в колосе; масса зерна с колоса; масса 1000 зерен; натура зерна; высота растений (среднее, 2022–2024 гг.) /

Fig. Location of cultivars and traits of winter rye in the factor plane: Y – yield; PSD – productive stem density; WH – winter hardiness; LR – lodging resistance; NSE – number of spikelets per ear; GWE – grain weight from the ear; TWG – 1000 grain weight; GU – grain-unit; PH – plant height (average for 2022–2024)

Заключение. С помощью метода главных компонент установлена различная роль агро-биологических признаков в формировании урожайности сортов озимой ржи в конкурсном сортоиспытании в разные годы. Разнонаправленный вклад в изменчивость урожайности внесли признаки ценоза (зимостойкость, поражение снежной плесенью, густота продуктивного стеблестоя, высота растений, устойчивость к полеганию) и продуктивности (количество колосков в колосе, масса зерна с колоса, масса 1000 зерен, натура зерна), что указывает на наличие конкуренции в агрофитоценозе. Большую часть изменчивости урожайности (53,3–56,8 %) объяснял фактор «адаптивность», а также второй фактор с неустойчивой структурой. В различных условиях среды наблюдали изменение структуры факторов и их роли в формировании продуктивного потенциала сортов. При достаточном увлажнении фактор «адаптивность» был наиболее тесно связан с зимостойкостью (факторная нагрузка составила 0,83–0,94), при дефиците влаги фактор «адаптивность» зависел от высоты растений (факторная нагрузка – 0,80). Второй фактор в благоприятных условиях зависел от количества колосков в колосе (факторная нагрузка – 0,80). В благоприятных условиях факторы в равной степени увеличивали урожайность (доля дисперсии 31,5 и 25,4 % соот-

ветственно). При усилении конкуренции между растениями в ценозе на фоне ухудшения условий среды (плохая перезимовка и летняя засуха) заметно возросла роль фактора «адаптивность» (доля дисперсии 53,3 и 38,1 % соответственно). Поражение снежной плесенью во все годы уменьшало продуктивный потенциал сортов в связи со снижением плотности стеблестоя и массы зерна с колоса. Сорта с высоким и низким вкладом фактора «адаптивность» в урожайность различались по выносливости к снежной плесени, зимостойкости, высоте растений, массе 1000 зерен, количеству колосков в колосе и массе зерна с колоса. Высокую урожайность в опыте сформировали сорта Лика и Батист с высоким вкладом и Графиня с низким вкладом фактора «адаптивность» (в среднем 4,97; 4,92; 4,88 т/га). Устойчивость урожайности сортов Лика и Батист проявлялась в стабильных факторных координатах на биplotе. Сорта Графиня, Флора, Рушник, Талица, Фаленская универсальная отличались сильным эффектом взаимодействия «генотип x среда» и сменой факторных координат на биplotе. В селекционной работе с озимой рожью в условиях Кировской области необходимо повышать продуктивный потенциал будущих сортов на основе признаков зимостойкости, высоты растений, количества колосков в колосе.

Список литературы

1. Гончаренко А. А. Экологическая устойчивость сортов зерновых культур и задачи селекции. Зерновое хозяйство России. 2016;(3):31–37. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26642951> EDN: WLASMV
2. Гончаренко А. А., Макаров А. В., Ермаков С. А., Семенова Т. В., Точилин В. Н., Цыганкова Н. В., Скатова С. Е., Крахмалева О. А. Экологическая устойчивость сортов озимой ржи с различным типом короткостебельности. Российская сельскохозяйственная наука. 2019;(3):3–9. DOI: <https://doi.org/10.31857/S2500-2627201933-9> EDN: UFHSWL
3. Переведенцев Ю. П., Френкель М. О., Шаймарданов М. З. Современные изменения климатических условий и ресурсов Кировской области. Науч. ред. Э. П. Наумов. Казань: Казанский ГУ, 2010. 242 с. Режим доступа: https://www.cnsrb.ru/Vexhib/rsh/10_8503.pdf
4. Кедрова Л. И., Уткина Е. И., Шамова М. Г., Набатова Н. А. Реализация адаптивного потенциала продуктивности озимой ржи в условиях региональных климатических изменений. АгроЭкоИнфо. 2019;(3(37)):29. Режим доступа: https://agroecoinfo.ru/TEXT/RUSSIAN/2019/st_320_annot.html
5. Пономарева М. Л., Пономарев С. Н. Научные основы селекции озимой ржи. Казань: изд-во ФЭН, 2019. 352 с.
6. Muszynska A., Guendel A., Melzer M., Moya Y. A., Roder M. S., Rolletschek H. et al. A mechanistic view on lodging resistance in rye and wheat: a multiscale comparative study. Plant Biotechnology Journal. 2021;19(12):2646–2661. DOI: <https://doi.org/10.1111/pbi.13689>
7. Чайкин В. В., Тороп А. А., Тороп Е. А., Голева Г. Г., Ващенко Т. Г. Структура урожайности высокогетерозисных гибридов озимой ржи и особенности ее формирования. Аграрный научный журнал. 2023;(11):136–143. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2023i11pp136-143> EDN: EEPExQ
8. Гудзенко В. Н. Статистическая и графическая (GGE biplot) оценка адаптивной способности и стабильности селекционных линий ячменя озимого. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2019;23(1):110–118. DOI: <https://doi.org/10.18699/VJ19.469> EDN: YXMGCT
9. Пономарев С. Н., Пономарева М. Л., Маннапова Г. С., Фомин С. И. Особенности формирования урожайности озимой ржи в контрастных гидротермических условиях севера Средневолжья. Зернобобовые и крупяные культуры. 2022;(4(44)):151–162. DOI: <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2022-4-151-162> EDN: LCIE TE
10. Desheva G., Valchinova E. Morpho-agronomic assessment of genetic diversity among rye accessions using multivariate analyses. Bulgarian Journal of Agricultural Science. 2023;29(2):338–350. URL: <https://agrojournal.org/29/02-17.pdf>
11. Дуктова Н. А., Гриб С. И., Иванова Е. В., Андроник Е. Л., Виноградов Д. В. Применение многомерного анализа для оценки селекционной ценности исходного материала твердой яровой пшеницы. АгроЭкоИнфо. 2023;(1(55)):13. DOI: <https://doi.org/10.51419/202131125> EDN: WCWOTI

12. Stepniewska S., Cacak-Pietrzak G., Fraś A., Jończyk K., Studnicki M., Wisniewska M. et al. Effect of genotype and environment on yield and technological and nutrition traits on winter rye grain from organic production. *Agriculture*. 2024;14(12):2249. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14122249>
13. Животовский Л. А. Интеграция полигенных систем в популяциях. Проблема анализа комплекса признаков. М.: Наука, 1984. С. 95–113.
14. Ровдо Т. В., Артюх Д. Ю. Результаты изучения коллекционных образцов озимой ржи по основным хозяйственно-ценным признакам. Земледелие и селекция в Беларуси. 2021;(57):251–258.
Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46430631> EDN: NFHJGL
15. Zuo Y., Zhang X., Zuo S., Ren X., Liu Z., Dong L., Li J. Changes of stem characteristics, senescence indexes and yield and quality of wintering rye under different populations. *Sustainability*. 2021;13(12):6876. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13126876>

References

1. Goncharenko A. A. Ecological stability of grain crop varieties and tasks of breeding. *Zernovoe khozyaystvo Rossii* = Grain Economy of Russia. 2016;(3):31–37. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26642951>
2. Goncharenko A. A., Makarov A. V., Ermakov S. A., Semenova T. V., Tochilin V. N., Tsygankova N. V., Skatova S. E., Krakhmaleva O. A. Ecological stability of varieties of winter rye with various type of a short-stem. *Rossiyskaya sel'skokhozyaystvennaya nauka* = Russian Agricultural Sciences. 2019;(3):3–9. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S2500-2627201933-9>
3. Perevedentsev Yu. P., Frenkel M. O., Shaymardanov M. Z. Modern changes in the climatic conditions and resources of the Kirov region. Scientific editor E. P. Naumov. *Kazan: Kazanskiiy GU*, 2010. 242 p. URL: https://www.cnshe.ru/Vexhib/rsh/10_8503.pdf
4. Kedrova L. I., Utkina E. I., Shamova M. G., Nabatova N. A. Realization of the adaptive productivity potential of winter rye in the context of regional climatic changes. *AgroEkoInfo* = AgroEcoInfo. 2019;(3(37)):29. (In Russ.). URL: https://agroecoinfo.ru/TEXT/RUSSIAN/2019/st_320_annot.html
5. Ponomareva M. L., Ponomarev S. N. Scientific foundations of winter rye breeding. *Kazan: izd-vo FEN*, 2019. 352 p.
6. Muszynska A., Guendel A., Melzer M., Moya Y. A., Roder M. S., Rolletschek H. et al. A mechanistic view on lodging resistance in rye and wheat: a multiscale comparative study. *Plant Biotechnology Journal*. 2021;19(12):2646–2661. DOI: <https://doi.org/10.1111/pbi.13689>
7. Chaykin V. V., Torop A. A., Torop E. A., Goleva G. G., Vashchenko T. G. Yield structure of highly heterosic winter rye hybrids and features of its formation. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2023;(11):136–143. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.28983/asi.v2023i11pp136-143>
8. Gudzenko V. N. Statistical and graphical (GGE biplot) evaluation of the adaptive ability and stability of winter barley breeding lines. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i seleksii* = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2019;23(1):110–118. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18699/VJ19.469>
9. Ponomarev S. N., Ponomareva M. L., Mannapova G. S., Fomin S. I. Features of winter rye yield formation in contrasting hydrothermal conditions of the northern middle Volga region. *Zernobobovye i krupyanye kul'tury* = Legumes and Groat Crops. 2022;(4(44)):151–162. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2022-4-151-162>
10. Desheva G., Valchinova E. Morpho-agronomic assessment of genetic diversity among rye accessions using multivariate analyses. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2023;29(2):338–350. URL: <https://agrojournal.org/29/02-17.pdf>
11. Duktova N. A., Grib S. I., Ivanova E. V., Andronik E. L., Vinogradov D. V. Application of multidimensional analysis for assessing the breeding value of the initial material of durum spring wheat. *AgroEkoInfo* = AgroEcoInfo. 2023;(1(55)):13. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51419/202131125>
12. Stepniewska S., Cacak-Pietrzak G., Fraś A., Jończyk K., Studnicki M., Wisniewska M. et al. Effect of genotype and environment on yield and technological and nutrition traits on winter rye grain from organic production. *Agriculture*. 2024;14(12):2249. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14122249>
13. Zhivotovskiy L. A. Integration of polygenic systems in populations. The problem of analyzing a set of features. Moscow: *Nauka*, 1984. pp. 95–113.
14. Rovdo T. V., Artyukh D. Yu. Results of studying collection accessions of winter rye in terms of the main economically important traits. *Zemledelie i selektsiya v Belarusi* = Arable Farming and Plant Breeding in Belarus. 2021;(57):251–258. (In Belarus). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46430631>
15. Zuo Y., Zhang X., Zuo S., Ren X., Liu Z., Dong L., Li J. Changes of stem characteristics, senescence indexes and yield and quality of wintering rye under different populations. *Sustainability*. 2021;13(12):6876. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13126876>

Сведения об авторах

✉ **Парфенова Елена Сергеевна**, кандидат с.-х. наук, заведующая лабораторией селекции и первичного семеноводства озимой ржи, 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/0000-0001-8919-4056>, e-mail: elka1745@yandex.ru

Псарева Екатерина Александровна, лаборант-исследователь, 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/0000-0002-9020-4765>

Information about the authors

✉ **Elena S. Parfenova**, PhD in Agricultural Science, Head of the Laboratory of Winter Rye Breeding and Primary Seed Production, 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/0000-0001-8919-4056>, e-mail: elka1745@yandex.ru

Ekaterina A. Psareva, research assistant, 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/0000-0002-9020-4765>

✉ – Для контактов / Corresponding author



Реакция сортов озимой мягкой пшеницы на стрессовое воздействие биотических и абиотических факторов среды

© 2025. Б. И. Сандухадзе, Л. А. Марченкова, Р. З. Мамедов, О. В. Павлова, В. В. Бугрова, М. С. Крахмалёва ✉, Р. Ф. Чавдарь, Т. Г. Орлова, Е. В. Савинов

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», Московская обл., Российская Федерация

Цель исследований – изучить степень устойчивости сортов озимой мягкой пшеницы к осмотическому, солевому и анаэробному стрессам на начальных этапах роста растений для отбора селекционно-ценных форм, проанализировать степень устойчивости сортов к биотическим стрессам (развитие болезней на семенах и всеивающих растениях) и оценить взаимосвязь параметров роста и адаптивности с урожайностью и элементами продуктивности. Объект исследований – 11 сортов и линий озимой мягкой пшеницы селекции Федерального исследовательского центра «Немчиновка». Исследования проводили в лабораторных условиях на фонах искусственно моделируемых абиотических стрессов на 7-дневных проростках методом рулонной культуры и в полевых опытах. Выявлены сорта с максимально широкой нормой реакции на токсическое воздействие изучаемых стрессоров, с самой высокой активизацией ростовых процессов и устойчивостью к болезням. Определен количественный и качественный состав возбудителей болезней и закономерности изменения фитосанитарного состояния семян и всхожести в зависимости от условий среды за период 1998–2023 гг. Изучен уровень корреляционной сопряженности между изучаемыми признаками, определена степень влияния ростовых процессов и адаптивности к стрессам на урожайность, массу 1000 семян и элементы продуктивности, показана важная роль активизации корневой системы в формировании этих показателей ($r = 0,45–0,71$). Отмечено, что в начальный период роста растений взаимосвязь стрессоустойчивости (индекса засухо- и солеустойчивости) с элементами продуктивности (массой 1000 семян, массой зерна с колоса и числом зерен с колоса) носит отрицательный характер ($r = -0,41...-0,63$). По совокупности изучаемых признаков выделены сорта Московская 74, Московская 39, Московская 40, Московская 56 и Васильевна, занимающие в рейтинге конкурентного преимущества с 1-го по 5-е место, способные противостоять стрессовым абиотическим и биотическим факторам среды как в лабораторных моделируемых условиях, так и в полевых.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., адаптивность, всхожесть, урожайность, элементы продуктивности, устойчивость к болезням

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства сельского хозяйства РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Немчиновка» (тема № FGGE-2022-0001).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Сандухадзе Б. И., Марченкова Л. А., Мамедов Р. З., Павлова О. В., Бугрова В. В., Крахмалёва М. С., Чавдарь Р. Ф., Орлова Т. Г., Савинов Е. В. Реакция сортов озимой мягкой пшеницы на стрессовое воздействие биотических и абиотических факторов среды. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(4):760–772. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.760-772>

Поступила: 02.03.2025

Принята к публикации: 07.08.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

The reaction of winter bread wheat cultivars to the stress effects of biotic and abiotic environmental factors

© 2025. Bagrat I. Sandukhadze, Lyudmila A. Marchenkova, Ramin Z. Mamedov, Olga V. Pavlova, Valentina V. Bugrova, Maria S. Krahmaleva ✉, Raisa F. Chavdar, Tatiana G. Orlova, Evgeniy V. Savinov

Federal Research Center «Nemchinovka», Moscow region, Russian Federation

The purpose of the research is to study the degree of resistance of winter bread wheat cultivars to osmotic, salt and anaerobic stresses at the initial stages of plant growth for the selection of breeding valuable forms, to analyze the degree of resistance of cultivars to biotic stresses (development of diseases on seeds and vegetative plants) and to evaluate the relationship of growth parameters and adaptability with yield and productivity elements. The objects of the research were 11 cultivars and lines of winter soft wheat bred by the Federal Research Center “Nemchinovka”. The studies were carried out in laboratory conditions on the backgrounds of artificially simulated abiotic stresses on the 7-day-old seedlings using the roll culture method and in field experiments. The cultivars with the widest possible response rate to the toxic effects of the studied stressors, with the highest activation of growth processes and resistance to diseases were identified. The quantitative and qualitative composition of pathogens and patterns of changes in the phytosanitary status of seeds and germination depending on environmental conditions for the period of 1998–2023 have been determined. The level of correlation between the studied traits was investigated, the degree of influence of growth processes and adaptivity to stress on yield, weight of 1000 seeds and productivity elements was determined, and the important role of root system activation in the formation of these indicators was shown ($r = 0.45–0.71$).

It was noted that in the initial period of plant growth, the relationship between stress resistance (drought and salt resistance index) and productivity elements (1000 seeds, grain weight per ear and the number of grains per ear) was negative ($r = -0.41...-0.63$). According to the totality of the studied characteristics there have been identified the cultivars 'Moskovskaya 74', 'Moskovskaya 39', 'Moskovskaya 40', 'Moskovskaya 56' and 'Vasilyevna' which occupy the 1st to 5th place in the rating of competitive advantage and are able to withstand stressful abiotic and biotic environmental factors both in laboratory simulated conditions and in the field.

Keywords: *Triticum aestivum* L., adaptability, germination, yield, productivity elements, disease resistance

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Research Center «Nemchinovka» (theme No. FGGE-2022-0001).

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: Sandukhadze B. I., Marchenkova L. A., Mamedov R. Z., Pavlova O. V., Bugrova V. V., Krahmaleva M. S., Chavdar R. F., Orlova T. G., Savinov E. V. The reaction of winter bread wheat cultivars to the stress effects of biotic and abiotic environmental factors. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):760–772. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.760-772>

Received: 02.03.2025

Accepted for publication: 07.08.2025

Published online: 29.08.2025

Озимая пшеница – важнейшая сельскохозяйственная культура, занимающая значительный удельный вес в структуре зернового клина РФ и обеспечивающая её продовольственную безопасность. Основными факторами, дестабилизирующими производство этой культуры в Нечерноземной зоне РФ, являются нарастание погодных аномалий, нестабильность метеорологических показателей в период вегетации растений.

Значительное варьирование биотических и абиотических факторов среды, усиливающиеся на фоне изменения климата, приводит к ощутимым потерям сельскохозяйственной продукции. К числу абиотических факторов, ограничивающих величину и качество урожая зерновых культур, относятся засуха, затопление и засоление, вызывающие нарушения физиолого-биохимических процессов, особенно в начальные этапы онтогенеза растений, оказывающие существенное влияние не только на их адаптацию, но и на снижение их ростовых функций [1, 2, 3].

В настоящее время имеется необходимость создания сортов озимой мягкой пшеницы, адаптированных к экстремальным условиям среды, с комплексом морфофизиологических признаков, способных эффективно использовать биоклиматические ресурсы региона и положительно влияющие на формирование урожайности [4, 5]. В связи с этим большой интерес представляет изучение ростовых параметров растений, дающих интегральную информацию как об изменениях физиологических процессов надземных и подземных органов растений в разные периоды жизни, так и об их реакции на стрессовые ситуации [6, 7]. В многочисленных исследованиях отмечено, что морфофизиологические признаки раннего онтогенеза играют ключевую роль в устойчивости растений к комплексу абиотических факторов и их можно

использовать в качестве информативных тестов для отбора устойчивых к стресс-факторам генотипов [2, 7, 8].

Экологическое взаимодействие биотических и абиотических факторов, нестабильность их проявления свидетельствуют о необходимости использования экспресс-лабораторного метода для оценки адаптивных и морфофизиологических признаков [9].

Таким образом, актуальность вышеуказанных проблем не вызывает сомнений, но требует дополнительных исследований по сортовой специфике ростовых параметров и адаптивности для отбора форм с высокой биологической полноценностью семян и устойчивостью к стресс-факторам.

Цель исследований – определить степень устойчивости сортов озимой мягкой пшеницы к осмотическому, солевому и анаэробному стрессам на начальных этапах роста растений для отбора селекционно-ценных форм, проанализировать степень устойчивости сортов к биотическим стрессам (развитие болезней на семенах и вегетирующих растениях) и оценить взаимосвязь параметров роста и адаптивности с урожайностью и элементами продуктивности.

Научная новизна – изучение сортовой специфики ростовых параметров и адаптивности озимой мягкой пшеницы к биотическим и абиотическим стрессам.

Материал и методы. Материалом исследования служили 11 сортов и линий озимой мягкой пшеницы селекции ФГБНУ «ФИЦ «Немчиновка»: Московская 39, Московская 40, Московская 56, Московская 82, Немчиновская 85 – включенные в Госреестр РФ; Московская 74, Московская 27, Московская 28, Московская 31, Васильевна – проходящие государственное сортоиспытание; линия Эритроспермум 606/21.

Стрессоустойчивость сортов изучали на начальных этапах роста растений по изменению всхожести и морфометрических признаков (длина ростков, корешков, coleoptile; число корешков; масса ростков и корешков) в лабораторных условиях на 7-дневных проростках с использованием метода рулонной культуры в двукратной повторности по 100 семян в каждой. Устойчивость к абиотическим факторам определяли по засухоустойчивости, солеустойчивости и устойчивости к анаэробным условиям на фонах искусственно моделируемых стрессов: обезвоживания [10], засоления хлоридом натрия [11] и длительного затопления в воде [12] по соотношению процента показателей опытных вариантов к контрольным; устойчивость к осмотическому и анаэробному стрессам – по депрессии прорастаемости семян, к солевому – по изменению длины ростков. Для получения контрольных значений семена проращивали в дистиллированной воде.

Для комплексной оценки устойчивости к абиотическим стрессам применяли ранжирование сортообразцов по индексу устойчивости «И», который представляет собой сумму показателей устойчивости к засухе, хлоридному засолению и переувлажнению ($I_1 + I_2 + I_3$), приведенных к единице [13]. Чем больше индекс устойчивости, тем выше стрессоустойчивость сортов. Рейтинг устойчивости определяли по величине индекса устойчивости, где образцу с наибольшим индексом присваивали номер 1 и далее по порядку. Образцам с одинаковой величиной индекса устойчивости присваивали одинаковый номер рейтинга. Уровень стрессоустойчивости наиболее высоким зафиксирован у сортов, занимающих первые места рейтинга в соответствии с индексом устойчивости.

Сорта с наибольшим рейтингом положительных признаков определяли путем баллового ранжирования по сумме числовых показателей урожайности, продуктивности и ростовых параметров, преобразованных в ранговый формат [14]. Коэффициент адаптивности (К.А.) рассчитывали в процентном выражении урожайности сортообразцов к среднему ее значению [15].

Урожайность сортов и линий определяли в полевых опытах на делянках площадью 10 м², в 4-кратной повторности при норме высева

5,0 млн всхожих семян на гектар, анализ структуры урожая – по Методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур¹.

Фенологические наблюдения осуществляли в соответствии со стадиями роста пшеницы по шкалам Й. С. Задокс и W. Феекес (J. C. Zadoks и W. Feekes) в изложении [16]. В фазу среднемолочной спелости (ф. 75) проводили учет интенсивности проявления септориоза листьев, бурой ржавчины, мучнистой росы, в фазу мягкой восковой спелости (ф. 85) – септориоза колоса. Для оценки сортов пшеницы к возбудителям пятнистостей в полевых условиях использовали модифицированную и дополненную шкалу Саари-Прескотта (Saari and Prescott, 1975) [17]. Поражение семян фузариозом определяли по ГОСТ 12044-93².

Статистическую обработку данных проводили методом дисперсионного анализа с помощью пакета программ Microsoft Excel 2007. Коэффициенты вариации рассчитывали по Б. А. Доспехову, в соответствии с классификацией этого автора дана оценка значениям коэффициентов вариации (CV): при CV < 10 % изменчивость – незначительная; CV = 10–20 % – средняя; CV > 20 % – значительная³.

Результаты и их обсуждение. Предпосылкой повышения потенциала продуктивности является здоровый семенной материал, качество которого в значительной мере зависит от условий среды – при неблагоприятных потери урожая зерна в отдельные годы достигают 60 % [18].

На основе ежегодного фитоанализа семян сортов и линий озимой пшеницы на протяжении 1998–2023 гг. выявлен патогенный комплекс возбудителей семенной инфекции, представленный в основном родами *Fusarium*, *Alternaria*, *Penicillium*. В годы с высокой влагообеспеченностью встречались и другие сапрофитные плесневые грибы – виды *Aspergillus* spp., *Mucor* spp., *Rhizopus* spp., *Cladosporium* spp., *Trichothecium* spp. и др., в основном не играющие существенной роли в патогенезе семян.

Многолетние исследования показали, что самым многочисленным представителем микобиоты зерна являются грибы рода *Alternaria*, заселенность которыми в зависимости от партии и года составляла 30–96 % [19]. Это, в основном, сапрофитные виды, но встречались (от 2 до 15 %)

¹Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. М.: Колос, 1989. 194 с.

²ГОСТ 12044-93. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения зараженности болезнями. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1993. 57 с.

URL: <https://fsvps.gov.ru/files/gost-12044-93-semena-selskohoziastvennyh-k/>

³Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

и способные продуцировать токсичные метаболиты – грибы видов *Alternaria* spp., *Bipolaris* spp., приводящие к заболеванию зерновки «черный зародыш» – задержке прорастания зерна и угнетению корневой системы. Также во всех образцах семян наблюдали смешанную инфекцию, состоящую из различных патогенных комплексов с преобладанием альтернариозно-фузариозного.

Инфицированность грибами родов *Penicillium* и *Aspergillus* не превышала 10 % и чаще всего носила сапрофитный характер, хотя в определенных условиях эти грибы переходили к паразитированию, частично или полностью разрушая зерно и причиняя вред во время хранения [19].

Из патогенной флоры самую высокую представленность в семенной популяции имели грибы рода *Fusarium*, вызывающие сильные

деструктивные изменения, проявляющиеся в уродливости, деформации, искривлении ростков и корешков по сравнению с нормальными проростками. Также во влажные годы постоянным компонентом семенной инфекции были бактерии.

Диапазон инфицированности фузариевыми грибами за годы исследований (1998–2023) находился в пределах 0–22 % и во многом определялся температурой и количеством осадков в предуборочный и уборочный периоды (рис. 1). В годы с высокой влагообеспеченностью, особенно в 1998, 2000, 2004, 2008, 2013, фитопатогенная нагрузка семян существенно увеличивалась, а всхожесть уменьшалась. Семенная инфекция вызывала существенное ингибирование роста зародышевых корешков и колеоптиле, а иногда приводила к гибели семян (от 5 до 20 %).

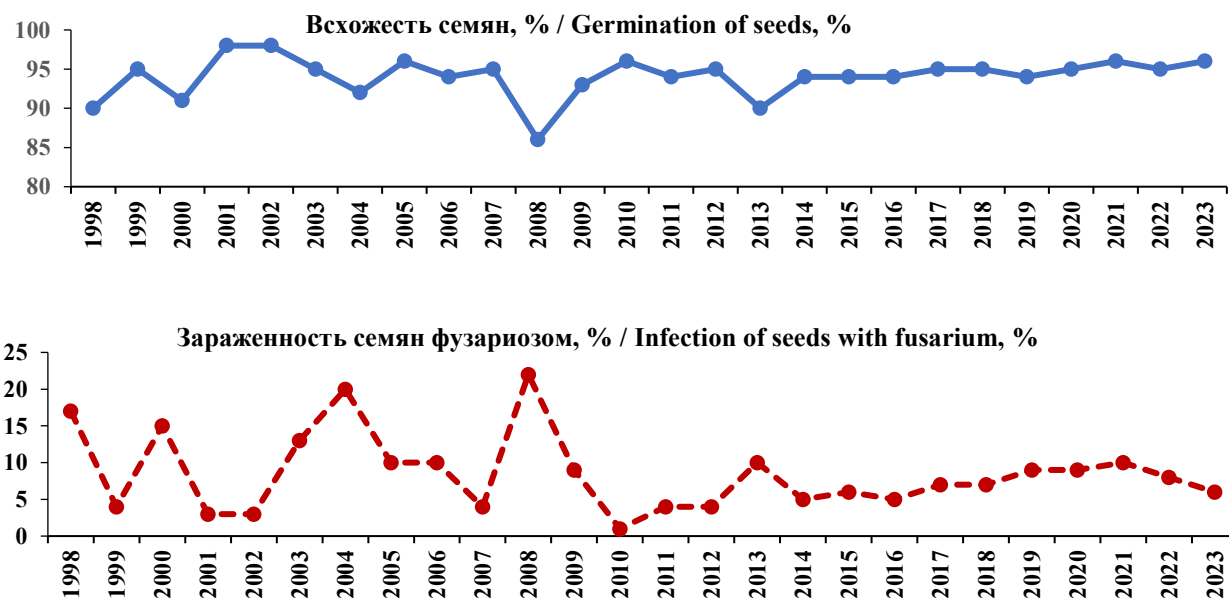


Рис. Изменение лабораторной всхожести и зараженности семян озимой мягкой пшеницы фузариозом (1998–2023 гг.) /

Fig. Changes in laboratory germination and infection of winter bread wheat seeds with fusarium (1998–2023)

В 2021–2023 гг. инфицированность семян фузариозом не превышала фитосанитарный регламент и его токсическое воздействие на всхожесть семян было незначительным (табл. 1) [20]. Средняя зараженность семян колебалась в амплитуде 4–9 %, гибель семян от данного возбудителя составила 3–5 % при всхожести 93–98 %. Семенная инфекция вызывалась в основном двумя наиболее распространенными в регионе видами – *Fusarium culmorum* и *Fusarium oxysporum*.

В ходе фитосанитарного мониторинга посевов озимой пшеницы в период «молочная

спелость – налив зерна», проведенного специалистами Всероссийского научно-исследовательского института фитопатологии (ВНИИФ), за период 2021–2023 гг. был выявлен патогенный комплекс вегетирующих растений. Наибольшее распространение в Центральных районах Нечерноземной зоны на озимой пшенице имели возбудители септориоза листьев (*Septoria tritici*), бурой ржавчины (*Puccinia triticina*) и мучнистой росы (*Blumeria graminis*). В отдельные годы наблюдали септориоз и фузариоз колоса (*Stagonospora nodorum* и *Fusarium graminearum*). Преимущественное развитие

в указанные годы (2021–2023), особенно в жарком и засушливом 2021 г., имел септориоз листьев, средняя зараженность изучаемых сортов достигала 12,8–25,3 %. Другие болезни проявились

в минимальных значениях: бурая ржавчина – 0–15,6 %, мучнистая роса – 0–8,8 %, септориоз колоса – 0,6–4,9 %, т. е. не достигали экономического порога вредоносности.

Таблица 1 – Развитие болезней семян и растений сортов озимой мягкой пшеницы (в среднем за 2021–2023 гг.) /
Table 1 – Development of diseases of seeds and plants of winter bread wheat cultivars (on average for 2021–2023)

<i>Сорт /</i> <i>Cultivar</i>	<i>Вегетирующие растения / Vegetating plants</i>				<i>Семена** /</i> <i>Seeds</i>
	<i>септориоз / septoria</i>		<i>бурая ржавчина /</i> <i>brown rust</i>	<i>мучнистая роса /</i> <i>powdery mildew</i>	<i>фузариоз /</i> <i>fusarium</i>
	<i>листьев /</i> <i>of the leaves</i>	<i>колоса /</i> <i>of the ear</i>			
Московская 39/ ‘Moscovskaya 39’	23,4	1,1	0,2	0	4,0
Московская 56/ ‘Moscovskaya 56’	25,3	1,1	7,6	0	5,0
Московская 40/ ‘Moscovskaya 40’	22,4	0,8	15,6	0	4,0
Московская 82/ ‘Moscovskaya 82’	17,5	1,0	1,7	0,7	7,5
Немчиновская 85/ ‘Nemchinovskaya 85’	17,9	4,9	0,4	0,7	6,0
Московская 74/ ‘Moscovskaya 74’	24,5	0,6	0	0	4,0
Московская 27/ ‘Moscovskaya 27’	19,9	0,6	14,0	0	6,0
Московская 28*/ ‘Moscovskaya 28’	12,8	0,9	0	0	9,0
Московская 31*/ ‘Moscovskaya 31’	13,6	2,8	0	8,8	4,5
Васильевна*/ ‘Vasylievna’	13,4	0,6	0	0	5,5
Среднее / Average	20,6	1,3	3,3	1,0	5,5

*Данные за 1 год; **средние данные за 2 года / *Data for 1 year; ** average data for 2 years

На фонах различных погодных условий 2021–2023 гг. были охарактеризованы сорта и линии озимой мягкой пшеницы по всхожести, урожайности и элементам продуктивности (табл. 2).

Наиболее неблагоприятным сложился 2021 г., отличающийся неравномерным количеством осадков: избыточным – ранней весной (в мае) и дефицитом (на 10–22 % ниже нормы) – в период формирования семян (июнь – июль) в сочетании с высокими температурами (ГТК = 0,85), превышающими среднегодовое значение соответственно на 2,6–3,4 °С. Это спровоцировало снижение массы 1000 семян, которая составила 37,5–48,0 г, и урожайности – 4,9–7,2 т/га.

2022 и 2023 гг. характеризовались в основном благоприятными для роста и развития растений погодными условиями. В 2022 г. у изучаемых сортов масса 1000 семян составила 41,6–53,4 г, урожайность – 5,7–10,7 т/га, в 2023 г. – 40,6–58,2 г и 5,9–10,2 т/га соответственно.

Самую высокую урожайность на протяжении 3 лет сформировали сорта Васильевна, Московская 82, Московская 74, Московская 27 и Московская 31 (8,23–9,70 т/га), массу 1000 семян – Васильевна, Московская 28, Московская 82, Московская 56 и Московская 40 (45,3–54,6 г), массу зерна с колоса – Васильевна, Московская 28, Московская 40 и Эритроспермум 606/21 (1,61–1,90 г), число зерен с колоса – Васильевна, Московская 28, Московская 40, Московская 74

и Эритроспермум 606/21 (34–44 шт.), число стеблей – Московская 31, Московская 82, Московская 56 и Московская 74 (453–473 шт.), наименьшую высоту – Васильевна, Мос-

ковская 31, Немчиновская 85 и Эритроспермум 606/12 (67–89 см) при средних значениях признаков соответственно – 7,90 т/га, 45,5 г, 1,60 г, 34,9 шт., 425 шт. и 94,5 см.

Таблица 2 – Характеристика урожайности и элементов продуктивности сортов озимой мягкой пшеницы (в среднем за 2021–2023 гг.) /

Table 2 – Characteristics of yields and productivity elements of winter bread wheat cultivars (on average for 2021–2023)

<i>Copt / Cultivar</i>	<i>Урожайность, т/га / Yield, t/ha</i>	<i>К.А., %</i>	<i>Масса 1000 семян, г / Weight of 1000 seeds, g</i>	<i>Масса зерна с колоса, г / Grain weight per ear, g</i>	<i>Число зерен в колосе, шт. / Number of grains per ear, pcs.</i>	<i>Число стеблей на 1 м², шт. / Number of stems/1 m², pcs.</i>	<i>Высота растений, см / Height of plants, cm</i>
Московская 40/ 'Moscovskaya 40'	7,21	91,1	45,3	1,61	36	397	97
Московская 82/ 'Moscovskaya 82'	8,23	65,6	49,6	1,50	30	469	98
Московская 74/ 'Moscovskaya 74'	8,40	106,3	44,1	1,30	35	562	103
Московская 56/ 'Moscovskaya 56'	7,12	89,9	46,2	1,54	33	473	109
Московская 27/ 'Moscovskaya 27'	8,39	106,3	40,4	1,28	32	404	99
Московская 28/ 'Moscovskaya 28'	7,88	100,0	51,7	1,90	42	413	97
Московская 31/ 'Moscovskaya 31'	8,58	108,9	44,7	1,54	34	453	87
Немчиновская 85/ 'Nemchinovskaya 85'	7,67	103,8	43,0	1,45	33	434	89
Васильевна/ 'Vasylievna'	9,70	122,8	54,6	1,84	34	322	84
Эритроспермум 606/21 / 'Erytrospermum 606/21'	5,91	74,7	39,4	1,82	44	326	67
Московская 39 'Moscovskaya 39'	7,43	93,7	41,0	1,31	31	449	109
Среднее / Average	7,90	96,9	45,5	1,60	34,9	425	94,5
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	0,45	-	3,9	0,25	2,1	67	5,8
CV, %	12,5	17,5	10,6	14,2	12,5	15,9	12,9

Рассчитанный коэффициент вариации по всем изучаемым признакам менялся в диапазоне 10–20 %, изменчивость была средней – от 10,6 до 17,5 %.

Лучшие результаты по большинству изучаемых признаков показали сорта Васильевна, Московская 28, Московская 40, Московская 31, Московская 74 и Московская 82.

Реакцию изучаемых образцов на сложившиеся условия среды определяли по коэффициенту адаптивности (процентному соотношению урожайности каждого образца к среднесортной), позволяющему судить об экологи-

ческой адаптивности изучаемых форм. По данному показателю (К.А., %) выделили сорта Васильевна, Московская 28, Московская 74, Московская 27, Московская 31 и Немчиновская 85 (100,0–122,8 %), которые представляют большой интерес для дальнейшего использования в селекционном процессе, так как отличаются не только адаптивностью к неблагоприятным факторам среды, но и комплексом хозяйственно ценных признаков.

На развитие растений влияют не только биотические, но и абиотические факторы среды, неблагоприятные могут задерживать развитие,

вызывая депрессию всхожести, замедление темпов роста растений вплоть до их гибели. Поэтому для решения задач по повышению урожайности и продуктивности селекция должна иметь адаптивную направленность.

Изучаемые образцы показали разный уровень адаптации к воздействию указанных токсичностей в зависимости от года выращивания, действующего фактора и сортовых особенностей изучаемых форм (табл. 3).

Таблица 3 – Индексы адаптивности сортов и линий озимой мягкой пшеницы к искусственно моделируемым стрессам (в среднем за 2021–2023 гг.) /

Table 3 – Indices of adaptability of winter bread wheat cultivars and lines to artificially modeled stresses (on average for 2021–2023)

<i>Copm / Cultivar</i>	<i>Устойчивость к стресс-факторам, % / Resistance to stress factors, %</i>			<i>Индекс устойчивости / Index of adaptability</i>	<i>Рейтинг устойчивости / Sustainability rating</i>
	<i>обезвоживание, И1 / dehydration, I1</i>	<i>засоление, И2 / salting, I2</i>	<i>затопление, И3 / flooding, I3</i>		
Московская 39 / ‘Moscovskaya 39’	68,0	55,0	66,0	1,89	2
Московская 56 / ‘Moscovskaya 56’	74,3	53,0	59,0	1,86	4
Московская 40 / ‘Moscovskaya 40’	77,3	55,3	56,3	1,89	2
Московская 82 / ‘Moscovskaya 82’	65,3	40,7	45,3	1,51	7
Немчиновская 85 / ‘Nemchinovskaya 85’	72,7	59,3	43,3	1,75	6
Московская 74 / ‘Moscovskaya 74’	77,0	52,5	57,0	1,87	3
Московская 27 / ‘Moscovskaya 27’	75,3	58,0	75,7	2,09	1
Московская 28 / ‘Moscovskaya 28’	53,0	45,5	40,0	1,39	9
Московская 31 / ‘Moscovskaya 31’	74,0	43,5	65,0	1,83	5
Васильевна / ‘Vasylievna’	54,5	35,0	50,5	1,40	8
Эритроспермум 606/21 / ‘Erytrospermum 606/21’	52,5	33,5	52,0	1,38	10
Среднее / Average	67,6	48,3	55,5	1,71	-

Средние показатели устойчивости сортов к обезвоживанию, засолению и затоплению составили 67,6, 48,3 и 55,5 % соответственно. В условиях осмотического стресса выявлено 64 %, солевого и анаэробного – по 54 % образцов, превышающих средние данные.

При этом сорта Московская 39, Московская 40, Московская 56, Московская 74 и Московская 27 отличались самым высоким индексом (1,86–2,09) и рейтингом устойчивости (1–4). Первые три сорта характеризуются высокой степенью адаптации к стресс-факторам не только в лаборатории, но и в условиях полевого стрессового воздействия, на протяжении многих лет (2013–2023 гг.) определя-

ются как высокоадаптивные к неблагоприятным факторам среды.

Для селекции большой интерес представляют образцы, сочетающие адаптивность с другими селекционными признаками, которые характеризуются высокой интенсивностью развития ростков, корешков, coleoptiles и другими. Для этого у 7-дневных проростков сортов и линий озимой пшеницы провели оценку всхожести и морфометрических признаков, выявившую различия по степени развития органов растений, которые по длине ростков составили 79–112 мм, длине корешков – 116–161 мм, длине coleoptiles – 41–78 мм, массе ростков – 8,2–13,0 г, массе корешков – 5,4–11,1 г (табл. 4).

Таблица 4 – Всхожесть и морфометрические показатели сортов озимой мягкой пшеницы (в среднем за 2021–2023 гг.) /

Table 4 – Germination and morphometric parameters of winter bread wheat cultivars (average for 2021–2023)

Сорт / Cultivar	Всхожесть, % / Germination, %	Длина, мм / Length, mm			Число корешков, шт. / Number of roots, pcs.	Масса, г / Weight, g		Сумма рангов* / The sum of the ranks
		ростков / sprouts	корешков / roots	колеоп- тиле / coleoptile		ростков / sprouts	корешков / roots	
Московская 40 / ‘Moscovskaya 40’	93	112	137	69	3,4	11,8	6,7	104
Немчиновская 85 / ‘Nemchinovskaya 85’	94	103	161	41	3,8	11,1	8,5	82
Московская 82 / ‘Moscovskaya 82’	98	109	157	46	4,3	12,2	11,1	90
Московская 39 / ‘Moscovskaya 39’	96	112	130	78	4,3	12,7	5,4	109
Московская 56 / ‘Moscovskaya 56’	98	92	122	56	4,9	10,9	7,1	100
Московская 28 / ‘Moscovskaya 28’	95	96	116	62	4,9	10,8	6,5	82
Московская 31 / ‘Moscovskaya 31’	90	89	158	52	4,2	8,2	6,5	86
Васильевна / ‘Vasylievna’	98	91	148	59	4,1	12,9	9,1	98
Эритроспермум 606/21 / ‘Erytrospermum 606/21’	94	79	125	53	3,3	12,3	10,6	61
Московская 27 / ‘Moscovskaya 27’	95	98	138	50	4,3	9,3	7,0	84
Московская 74 / ‘Moscovskaya 74’	96	97	148	52	4,3	11,9	8,5	114
Среднее / Average	95,2	99,6	138,9	55,3	4,2	11,3	8,0	91,8
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	-	7,6	10,2	4,8	0,4	1,3	0,8	-
CV, %	3,2	11,5	12,3	16,2	13,8	15,6	25,8	-

*Сумма числовых значений всех изучаемых признаков (всхожести, морфометрических, урожайности, продуктивности, адаптивности), преобразованных в ранговый формат /

*The sum of the numerical values of all studied traits (germination, morphometric, yield, productivity, adaptivity) converted to a rank format

В работе были выделены формы как с высокой степенью депрессии, так и с высокой активизацией роста и развития растений. Лучшие показатели по длине первичных корешков имели сорта Немчиновская 85, Московская 28 и Московская 82 (161–157 мм), длине ростков – Московская 39, Московская 40 и Московская 82 (112–109 мм), длине coleoptile – Московская 39, Московская 40 и Московская 28 (78–62 мм), массе ростков – Васильевна, Московская 39 и Московская 82 (13,0–12,2 г), массе корешков – Московская 82 и Эритроспермум 606/21 (11,1–10,6 г), числу корешков

– Московская 56 и Московская 28 (по 4,9 шт.). Оптимальные сочетания лучших признаков отмечены у сортов Московская 82, Московская 40, Московская 39.

Значения коэффициента вариации по признакам были неодинаковыми, незначительная изменчивость выявлена по всхожести (CV = 3,2 %). Высокий коэффициент вариации получили по признаку «масса корешков», CV = 25,8 %. По остальным морфометрическим признакам вариация была средней – от 11,5 до 16,2 %.

Таблица 5 – Коэффициенты корреляции между признаками продуктивности, морфометрическими показателями и индексами адаптивности (2021–2023 гг.) /
Table 5 – Correlation coefficients between productivity traits, morphometric indicators, and adaptability indices (2021–2023)

Признак / Trait	Урожайность / Yield	Масса 1000 зерен / Weight of 1000 grains	Масса зерна с колоса / Weight of grain per ear	Число зерен в колосе / Number of grains per ear	Индекс устойчивости / Sustainability index	Засухоустойчивость / Drought resistance	Солеустойчивость / Salt resistance	Длина корешков / The length of the roots	Число корешков / Number of roots
Урожайность / Yield	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Масса 1000 зерен / Weight of 1000 grains	0,21	-	-	-	-	-	-	-	-
Масса зерна с колоса / Weight of grain per ear	0,18	0,71	-	-	-	-	-	-	-
Число зерен с колоса / Number of grains per ear	0,15	-0,03	0,75	-	-	-	-	-	-
Индекс устойчивости / Sustainability index	0,22	-0,54	-0,48	-0,48	-	-	-	-	-
Засухоустойчивость / Drought resistance	0,19	-0,41	-0,60	-0,61	0,71	-	-	-	-
Солеустойчивость / Salt resistance	0,11	-0,46	-0,46	-0,63	0,79	0,11	-	-	-
Длина корешков / The length of the roots	0,45	0,40	0,49	0,50	0,01	-0,12	0,18	-	-
Число корешков / Number of roots	0,46	0,39	0,65	0,54	0,04	0,15	0,10	-0,27	-

Взаимосвязь комплекса изучаемых показателей (всхожести; длины ростков, корешков, coleoptile; числа корешков; массы ростков и корешков; стрессоустойчивости) с урожайностью и элементами продуктивности представлена в виде суммы рангов числовых показателей, преобразованных в ранговый формат, свидетельствующий о рейтинге конкурентного преимущества (1–5) сортов Московская 74, Московская 39, Московская 40, Московская 56 и Васильевна.

В работе был определен уровень корреляционной сопряженности урожайности, её элементов, а также индексов адаптивности и морфометрических признаков озимой пшеницы (табл. 5). Урожайность имела среднюю степень корреляции с длиной и числом корешков – 0,45 и 0,46 соответственно. Масса зерна с колоса, формирующаяся из числа зерен в колосе и массы 1000 зерен, имела сильную взаимосвязь с этими показателями – $r = 0,75$ и $0,71$ соответственно.

Средняя отрицательная корреляция выявлена между индексом устойчивости и массой 1000 зерен ($r = -0,54$), между засухоустойчивостью и массой зерна с колоса ($r = -0,60$), засухоустойчивостью и числом зерен в колосе ($r = -0,61$), солеустойчивостью и числом зерен в колосе ($r = -0,63$).

Сильная сопряженность была отмечена между индексом устойчивости и засухоустойчивостью и солеустойчивостью – $r = 0,71$ и $0,79$ соответственно.

Полученные данные свидетельствуют о важной роли корневой системы раннего онтогенеза в формировании урожайности, массы 1000 зерен и других элементов продуктивности.

Заключение. В результате анализа лабораторной всхожести сортов озимой пшеницы (1998–2023 гг.) выявлены закономерности изменения посевных качеств семян, количественного и качественного состава возбудителей семенной инфекции, показано, что основными причинами развития болезней является высокая влагообеспеченность в предуборочный и, особенно, в уборочный периоды.

На фонах искусственно моделируемых стрессов (осмотического, анаэробного и солевого) выявлены сорта озимой мягкой пшеницы с максимально широкой нормой реакции на токсическое воздействие изучаемых стрессоров, способные противостоять неблагоприятным факторам среды – Московская 39, Московская 40, Московская 56.

При изучении особенностей развития органов растений раннего онтогенеза была показана сортовая специфика и выделены образцы

с самой высокой активизацией ростовых процессов в стрессовых условиях: Московская 74, Московская 39, Московская 40, Московская 56 и Васильевна. По результатам полученных корреляций определена важная роль корневой системы раннего онтогенеза в формировании урожайности, массы 1000 семян и элементов продуктивности, получены сведения о сопряженности стрессоустойчивости с ростовыми показателями на начальных этапах онтогенеза.

По совокупности изучаемых показателей, преобразованных в ранговый формат, и рейтинга конкурентного преимущества (1–5 места) выявлены сорта – Московская 39, Московская 40, Московская 74, Московская 56 и Московская 27 с наибольшим числом хозяйственно ценных признаков, способных противостоять абиотическим и биотическим факторам среды как на стадии проростков в лабораторных условиях, так и в полевых испытаниях.

Список литературы

1. Бутковская Л. К., Кузьмин Д. Н., Агеева Г. М. Оценка урожайных свойств партий семян сортов яровой пшеницы по параметрам органов проростков в условиях Красноярской лесостепи. Достижения науки и техники АПК. 2019;33(7):37–40. DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10709> EDN: ZMFWE5
2. Khalid M., Gul A., Amir R., Ali M., Afzal F., Quraishi U. et al. QTL mapping for seedling morphology under drought stress in wheat cross synthetic (W7984) / Opat. Plant Genetic Resources: Characterization and Utilization. 2018;16(4):359–366. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1479262118000023>
3. Бишарев А. А., Шевченко С. Н., Мадякин Е. В., Калякулина И. А., Дюльдина М. А., Дворцова Т. В. Влияние агрометеорологических условий на урожай зерна ярового ячменя в условиях Среднего Поволжья. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018;20(2-4):667–670. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37313255> EDN: DKRXGI
4. Ионов Е. В. Устойчивость сортов и линий озимой пшеницы к водному и температурному стрессам. Зерновое хозяйство России. 2011;(3):19–26. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17039181> EDN: OIWOXD
5. Мельникова Т. В. Оценка коллекционного материала озимой мягкой пшеницы различного эколого-географического происхождения по устойчивости к перезимовке и болезням. Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2023;(1):88–92. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50394961> EDN: MBQGKR
6. Ерошенко Л. М., Марченкова Л. А., Павлова О. В., Чавдарь Р. Ф., Орлова Т. Г., Дедушев И. А. Сортные особенности растений ярового ячменя по устойчивости к абиотическим стрессовым факторам на фоне различного уровня азотного питания. Аграрная Россия. 2022;(1):8–12. DOI: <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2022-1-8-12> EDN: SHKNUD
7. Сандухадзе Б. И., Марченкова Л. А., Мамедов Р. З., Павлова О. В., Бугрова В. В., Крахмалёва М. С. и др. Характеристика сортов и линий озимой пшеницы по морфофизиологическим параметрам. Аграрная Россия. 2023;(4):15–20. DOI: <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2023-4-15-20> EDN: CTXRTF
8. Ерошенко Л. М., Марченкова Л. А., Павлова О. В., Ромахина В. В., Чавдарь Р. Ф., Орлова Т. Г. и др. Особенности морфометрических показателей и адаптивности коллекционных образцов ярового ячменя к стресс-факторам на начальных этапах роста растений. Аграрная Россия. 2024;(10):7–11. DOI: <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2024-10-7-12> EDN: NNKHNH
9. Боме Н. А., Колоколова Н. Н., Белозерова А. А., Воронова Н. С., Боме А. Я., Иеронова В. В. Устойчивость сортов зерновых культур к стрессовым факторам. Успехи современного естествознания. 2006;(4):28а.
10. Кожушко Н. Н. Оценка засухоустойчивости полевых культур. Диагностика устойчивости растений к стрессовым воздействиям: методическое руководство. Л.: ВИР, 1988. С. 10–24.

11. Семушкина Л. А., Хазова Г. В., Удовенко Г. В. Применение анализа изменения ростовых процессов для диагностики солеустойчивости растений. Методы оценки устойчивости растений к неблагоприятным факторам среды. Л.: «Колос», 1976. С. 238–343.
12. Белецкая Е. К., Остапчук Е. Д. Оценка устойчивости озимых культур к вымоканию и ледяной корке. Диагностика устойчивости растений к стрессовым воздействиям: методическое руководство. Л., 1988. С. 182–186.
13. Сандухадзе Б. И., Марченкова Л. А., Рыбакова М. И., Воейкова А. А., Чавдарь Р. Ф. Реакция сортов озимой пшеницы на искусственно создаваемые стрессы для оценки их адаптивности на ранних этапах онтогенеза. Агрохимический вестник. 2015;(3):27–31. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23687377> EDN: TYJCZP
14. Ерошенко Л. М., Марченкова Л. А., Павлова О. В., Чавдарь Р. Ф., Орлова Т. Г., Ромахина В. В. Особенности морфофизиологических признаков семян и органов проростков сортов ярового ячменя селекции ФИЦ «Немчиновка». Аграрная Россия. 2023;(10):3–7. DOI: <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2023-10-3-7> EDN: VQVSIT
15. Животков Л. А., Морозова Я. А., Секатуева Л. И. Методика выявления потенциальной продуктивности и адаптивности сортов и селекционных форм озимой пшеницы по показателю «урожайности». Селекция и семеноводство. 1994;(2):3–6.
16. Ефремова Т. Т., Чуманова Е. В. Стадии роста и развития пшеницы и их значение в формировании элементов продуктивности. Письма в Вавиловский журнал генетики и селекции. 2023;9(2):54–80. DOI: <https://doi.org/10.18699/LettersVJ-2023-9-09> EDN: ETNAZJ
17. Saari E. E., Prescott J. M. A scale for appraising the foliar intensity of wheat diseases. Plant Disease Report. 1975;59:377–380.
18. Пономарева М. Л., Пономарев С. Н., Якупова Г. Г., Маннапова Г. С. Потери урожая озимой ржи от комплекса грибных болезней. Владимирский земледелец. 2011;(2(56)):22–26. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16951310> EDN: OGYAPAP
19. Павлова О. В., Марченкова Л. А., Чавдарь Р. Ф., Орлова Т. Г., Савоськина О. А. Оценка сортов зерновых культур по показателям качества семян и стрессоустойчивости. Владимирский земледелец. 2021;(2):52–57. DOI: <https://doi.org/10.24412/2225-2584-2021-2-52-57> EDN: KHMTBN
20. Гагкаева Т. Ю., Гаврилова О. П., Левитин М. М., Новожилов К. В. Фузариоз зерновых культур. Защита и карантин растений. 2011;(55):69–120. Режим доступа: <http://z-i-k-r.ru/interest/fuzarioz.pdf>

References

1. Butkovskaya L. K., Kuzmin D. N., Ageeva G. M. Evaluation of the yield properties of spring wheat by the parameters of sprouts' organs under the conditions of the Krasnoyarsk forest-steppe. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of AICis*. 2019;33(7):37–40. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10709>
2. Khalid M., Gul A., Amir R., Ali M., Afzal F., Quraishi U. et al. QTL mapping for seedling morphology under drought stress in wheat cross synthetic (W7984) / Opata. *Plant Genetic Resources: Characterization and Utilization*. 2018;16(4):359–366. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1479262118000023>
3. Bisharev A. A., Shevchenko S. N., Madyakin E. V., Kalyakulina I. A., Dyuldina M. A., Dvortsova T. V. The influence of agrometeorological conditions on grain yield of spring barley in the conditions of middle Volga region. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2018;20(2-4):667–670. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37313255>
4. Ionova E. V. Resistance of winter wheat varieties and lines to water and temperature stresses. *Zernovoe khozyaystvo Rossii = Grain Economy of Russia*. 2011;(3):19–26. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17039181>
5. Melnikova T. V. Assessment of the collection material of winter soft wheat of various ecological and geographical origin in terms of resistance to overwintering and diseases. *Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii = Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy*. 2023;(1):88–92. (In Belarus). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50394961>
6. Eroshenko L. M., Marchenkova L. A., Pavlova O. V., Chavdar R. F., Orlova T. G., Dedushev I. A. Varietal characteristics of spring barley plants in terms of resistance to abiotic stress factors against the background of different levels of nitrogen nutrition. *Agrarnaya Rossiya = Agrarian Russia*. 2022;(1):8–12. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2022-1-8-12>
7. Sandukhadze B. I., Marchenkova L. A., Mamedov R. Z., Pavlova O. V., Bugrova V. V., Krakhmaleva M. S. et al. Characteristics of winter wheat varieties and lines according to morphophysiological parameters. *Agrarnaya Rossiya = Agrarian Russia*. 2023;(4):15–20. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2023-4-15-20>
8. Eroshenko L. M., Marchenkova L. A., Pavlova O. V., Romakhina V. V., Chavdar R. F., Orlova T. G. et al. Features of morphometric indicators and adaptability of spring barley collection samples to stress factors at the initial stages of plant growth. *Agrarnaya Rossiya = Agrarian Russia*. 2024;(10):7–11. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2024-10-7-12>

9. Bome N. A., Kolokolova N. N., Belozerova A. A., Voronova N. S., Bome A. Ya., Ieronova V. V. Stability of grades of grain crops to stressful factors. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2006;(4):28a. (In Russ.).
10. Kozhushko N. N. Assessment of drought resistance of field crops. Diagnostics of plant resistance to stress: methodical guidance. Leningrad: *VIR*, 1988. pp. 10–24.
11. Semushkina L. A., Khazova G. V., Udovenko G. V. The use of analysis of changes in growth processes for the diagnosis of salt resistance of plants. Methods for assessing plant resistance to adverse environmental factors. Leningrad: «*Kolos*», 1976. pp. 238–343.
12. Beletskaya E. K., Ostaplyuk E. D. Assessment of the resistance of winter crops to soaking and ice crust. Diagnostics of plant resistance to stress: methodical guidance. Leningrad, 1988. pp. 182–186.
13. Sandukhadze B. I., Marchenkova L. A., Rybakova M. I., Voeykova A. A., Chavdar R. F. Winter wheat varieties reaction to artificial stresses for estimation of its adaptation at early stages of ontogenesis. *Agrokhimicheskiy vestnik = Agrochemical Herald*. 2015;(3):27–31. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23687377>
14. Eroshenko L. M., Marchenkova L. A., Pavlova O. V., Chavdar R. F., Orlova T. G., Romakhina V. V. Features of morphophysiological signs of seeds and organs of seedlings of spring barley varieties selected by FRC "Nemchinovka". *Agrarnaya Rossiya = Agrarian Russia*. 2023;(10):3–7. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30906/1999-5636-2023-10-3-7>
15. Zhirovkov L. A., Morozova Ya. A., Sekatueva L. I. Methodology for identifying the potential productivity and adaptability of winter wheat cultivars and breeding forms based on the "productivity" indicator. *Seleksiya i semenovodstvo*. 1994;(2):3–6. (In Russ.).
16. Efremova T. T., Chumanova E. V. Stages of growth and development of wheat and their importance in the formation of productivity elements. *Pis'ma v Vavilovskiy zhurnal genetiki i seleksii = Letters to the Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2023;9(2):54–80. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18699/LettersVJ-2023-9-09>
17. Saari E. E., Prescott J. M. A scale for appraising the foliar intensity of wheat diseases. *Plant Disease Report*. 1975;59:377–380.
18. Ponomareva M. L., Ponomarev S. N., Yakupova G. G., Mannapova G. S. Yield losses of winter rye from the complex of fungal diseases. *Vladimirskiy zemledelets = Vladimir agricolist*. 2011;(2(56)):22–26. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16951310>
19. Pavlova O. V., Marchenkova L. A., Chavdar R. F., Orlova T. G., Savoskina O. A. Assessment of grain crops on seed quality and resistance to unfavourable conditions. *Vladimirskiy zemledelets = Vladimir agricolist*. 2021;(2):52–57. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/2225-2584-2021-2-52-57>
20. Gagkaeva T. Yu., Gavrilova O. P., Levitin M. M., Novozhilov K. V. Fuzarioz zernovykh kul'tur. *Zashchita i karantin rasteniy*. 2011;(S5):69–120. (In Russ.). URL: <http://z-i-k-r.ru/interest/fuzarioz.pdf>

Сведения об авторах

Сандухадзе Баграт Исменович, доктор с.-х. наук, академик РАН, главный научный сотрудник лаборатории селекции и первичного семеноводства озимой пшеницы, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», ул. Агрохимиков, д. 6, рп. Новоивановское, г. Одинцово, Московская область, Российская Федерация, 143026, e-mail: mosniish@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7184-7645>

Марченкова Людмила Александровна, кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», ул. Агрохимиков, д. 6, рп. Новоивановское, г. Одинцово, Московская область, Российская Федерация, 143026, e-mail: mosniish@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6029-8089>

Мамедов Рамин Закирович, кандидат с.-х. наук, заведующий лабораторией селекции и первичного семеноводства озимой пшеницы, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», ул. Агрохимиков, д. 6, рп. Новоивановское, г. Одинцово, Московская область, Российская Федерация, 143026, e-mail: mosniish@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2473-4538>

Павлова Ольга Викторовна, кандидат с.-х. наук, зав. лабораторией, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», ул. Агрохимиков, д. 6, рп. Новоивановское, г. Одинцово, Московская область, Российская Федерация, 143026, e-mail: mosniish@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7705-0751>

Бугрова Валентина Васильевна, старший научный сотрудник лаборатории селекции и первичного семеноводства озимой пшеницы, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», ул. Агрохимиков, д. 6, рп. Новоивановское, г. Одинцово, Московская область, Российская Федерация, 143026, e-mail: mosniish@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5730-7826>

✉ **Крашмалёва Мария Сергеевна**, старший научный сотрудник лаборатории селекции и первичного семеноводства озимой пшеницы, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», ул. Агрохимиков, д. 6, рп. Новоивановское, г. Одинцово, Московская область, Российская Федерация, 143026, e-mail: mosniish@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0861-1514>, e-mail: korovushkina.mar@bk.ru

Чавдарь Раиса Федоровна, старший научный сотрудник лаборатории семеноведения и сертификации семян, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», ул. Агрохимиков, д. 6, рп. Новоивановское, г. Одинцово, Московская область, Российская Федерация, 143026, e-mail: mosniish@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1843-8938>

Орлова Татьяна Григорьевна, старший научный сотрудник лаборатории семеноведения и сертификации семян, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», ул. Агрохимиков, д. 6, рп. Новоивановское, г. Одинцово, Московская область, Российская Федерация, 143026, e-mail: mosniish@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7482-9813>

Савинов Евгений Владимирович, научный сотрудник лаборатории селекции и первичного семеноводства озимой пшеницы, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», ул. Агрохимиков, д. 6, рп. Новоивановское, г. Одинцово, Московская область, Российская Федерация, 143026, e-mail: mosniish@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9767-1555>

Information about the authors

Bagrat I. Sandukhadze, DSc in Agricultural Science, academician of RAS, chief researcher, the Laboratory of Breeding and Primary Seed Production of Winter Wheat, Federal Research Center "Nemchinovka", 6 Agrokhimikov St., Novoivanovskoye settlement, Odintsovo, Moscow Region, Russian Federation, 143026, e-mail: mosniish@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7184-7645>

Lyudmila A. Marchenkova, PhD in Agricultural Science, leading researcher, Federal Research Center "Nemchinovka", 6 Agrokhimikov St., Novoivanovskoye settlement, Odintsovo, Moscow Region, Russian Federation, 143026, e-mail: mosniish@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6029-8089>

Ramin Z. Mamedov, PhD in Agricultural Science, Head of the Laboratory of Breeding and Primary Seed Production of Winter Wheat, Federal Research Center "Nemchinovka", 6 Agrokhimikov St., Novoivanovskoye settlement, Odintsovo, Moscow Region, Russian Federation, 143026, e-mail: mosniish@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2473-4538>

Olga V. Pavlova, PhD in Agricultural Science, Head of the Laboratory, Federal Research Center "Nemchinovka", 6 Agrokhimikov St., Novoivanovskoye settlement, Odintsovo, Moscow Region, Russian Federation, 143026, e-mail: mosniish@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7705-0751>

Valentina V. Bugrova, senior researcher, the Laboratory of Breeding and Primary Seed Production of Winter Wheat, Federal Research Center "Nemchinovka", 6 Agrokhimikov St., Novoivanovskoye settlement, Odintsovo, Moscow Region, Russian Federation, 143026, e-mail: mosniish@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5730-7826>

✉ **Maria S. Krahmaleva**, senior researcher, the Laboratory of Breeding and Primary Seed Production of Winter Wheat, Federal Research Center "Nemchinovka", 6 Agrokhimikov St., Novoivanovskoye settlement, Odintsovo, Moscow Region, Russian Federation, 143026, e-mail: mosniish@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0861-1514>, e-mail: korovushkina.mar@bk.ru

Raisa F. Chavdar, senior researcher, the Laboratory of Seed Science and Seed Certification, Federal Research Center "Nemchinovka", 6 Agrokhimikov St., Novoivanovskoye settlement, Odintsovo, Moscow Region, Russian Federation, 143026, e-mail: mosniish@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1843-8938>

Tatiana G. Orlova, senior researcher, the Laboratory of Seed Science and Seed Certification, Federal Research Center "Nemchinovka", 6 Agrokhimikov St., Novoivanovskoye settlement, Odintsovo, Moscow Region, Russian Federation, 143026, e-mail: mosniish@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7482-9813>

Evgeniy V. Savinov, researcher, the Laboratory of Breeding and Primary Seed Production of Winter Wheat, Federal Research Center "Nemchinovka", 6 Agrokhimikov St., Novoivanovskoye settlement, Odintsovo, Moscow Region, Russian Federation, 143026, e-mail: mosniish@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9767-1555>

✉ – Для контактов / Corresponding author



Новый сорт мягкой яровой пшеницы Темп

© 2025. О. С. Амунова ✉

ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого», г. Киров, Российская Федерация

В современных условиях развития АПК для увеличения валовых сборов зерна пшеницы необходимы урожайные, высокотехнологичные, агроэкологически устойчивые сорта. В статье приводятся результаты изучения хозяйственно ценных признаков и адаптивных свойств нового среднеспелого сорта мягкой яровой пшеницы Темп селекции Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого (г. Киров) в сравнении со стандартным сортом Каменка. Исследования проводили в 2018–2024 гг. в питомнике конкурсного сортоиспытания (КСИ) по Методике государственного сортоиспытания. Средняя урожайность зерна сорта Темп в питомнике КСИ составила $3,01 \pm 0,35$ т/га, стандарта – $2,80 \pm 0,29$ т/га; вариабельность признака у нового сорта отмечали на уровне $4,0...24,0$ %, у стандарта – $3,8...26,2$ %. На трех сортоучастках Кировской области средняя урожайность зерна сорта Темп в годы испытания (2023–2024) составила $3,70 \pm 0,28$ т/га, стандарта Каменка – $3,49 \pm 0,29$ т/га. Новый сорт превосходит стандарт по высоте растений (на 14,4 %), при этом проявляет устойчивость к полеганию (8 баллов). Достоинствами сорта Темп являются пластичность (индекс генетической гибкости – 3,0, у стандарта – 2,7), отзывчивость на благоприятные условия выращивания (K_p – 2,7, у стандарта – 2,4), высокое качество зерна (ценная пшеница), комплексная устойчивость к листовым и колосковым болезням, толерантность к загущению.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., селекция, урожайность, качество, адаптивность, стабильность, устойчивость к болезням

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (тема № FNWE-2022-0007).

Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Амунова О. С. Новый сорт мягкой яровой пшеницы Темп. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(4):773–780. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.773-780>

Поступила: 20.03.2025

Принята к публикации: 07.08.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

‘Temp’ is a new cultivar of spring bread wheat

© 2025. Oksana S. Amunova ✉

Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Kirov, Russian Federation

In modern conditions of development of the agro-industrial complex, high-yielding, high-tech, agroecologically stable cultivars are needed to increase gross harvests of wheat grain. The article presents the results of studying economically valuable traits and adaptive properties of ‘Temp’ new mid-season cultivar of soft spring wheat, bred by the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, (Kirov) in comparison with the standard cultivar ‘Kamenka’. The studies were conducted in 2018–2024 in the competitive variety testing nursery according to the state variety testing methods. The average grain yield of the ‘Temp’ cultivar in the competitive variety testing nursery was 3.01 ± 0.35 t/ha, the standard – 2.80 ± 0.29 t/ha; the variability of the trait in the new cultivar was noted at the level of $4.0...24.0$ %, in the standard – $3.8...26.2$ %. On three variety test plots in the Kirov region, the average grain yield of the ‘Temp’ cultivar during the testing years (2023–2024) was 3.70 ± 0.28 t/ha, the ‘Kamenka’ standard had 3.49 ± 0.29 t/ha. The new cultivar exceeds the standard in plant height (by 14.4 %), while demonstrating resistance to lodging (8 points). The advantages of the ‘Temp’ cultivar are plasticity (genetic flexibility index is 3.0, while the standard has 2.7), responsiveness to favorable growing conditions (K_p is 2.7, while the standard has 2.4), high grain quality (valuable wheat), complex resistance to leaf and spike diseases, and tolerance to thickening.

Keywords: *Triticum aestivum* L., breeding, yield, quality, adaptability, stability, disease resistance

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 Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (theme No. FNWE-2022-0007).

The author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

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

For citation: Amunova O. S. ‘Temp’ is a new cultivar of spring bread wheat. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):773–780. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.773-780>

Received: 20.03.2025

Accepted for publication: 07.08.2025

Published online: 29.08.2025

Возделыванию пшеницы в сельскохозяйственном производстве России отводится ведущая роль. Культура имеет важное стратегическое значение в обеспечении продовольственной безопасности страны: зерно и продукты его переработки – это корм для сельскохозяйственных животных и сырье для пищевой промышленности. По данным Росстата, в 2024 году посевы пшеницы занимали площадь около 28,5 млн га, а валовой сбор зерна составил 82,4 млн т. Страна входит в число лидеров по экспорту пшеницы: за прошедший календарный год оценочно он составил 52,6 млн т благодаря сохранению высоких уровней вывоза в Бразилию и Мексику, увеличению поставок в страны Африки и Юго-Восточной Азии, отгрузок на новые рынки стран Ближнего Востока¹. Устойчивое и эффективное развитие зернопроизводства становится важнейшей задачей для российских регионов; требуются технологии, способствующие повышению производительности и рентабельности отрасли. Выдвигаются новые подходы, связанные с внедрением характеризующихся пластичностью, мобильностью и устойчивостью к стрессовым факторам методов производства [1], например, ориентация на средних и мелких производителей в сельских, пригородных районах и даже городских зонах. Рекордные урожаи, которые наблюдаются в последние годы, были бы невозможны без расширения посевных площадей и соблюдения севооборотов². Еще одним важным решением может стать замена возделываемых сортов новыми высокопродуктивными, технологически улучшенными, а главное, агроэкологически специализированными [2, 3], пригодными для выращивания в инновационных системах земледелия [4, 5]. Современная аграрная наука подтверждает, что использование районированных сортов нового поколения может в 1,5 раза увеличить урожайность [6].

По информации пресс-службы Минобрнауки России, в настоящее время 98 % возделываемой в стране пшеницы обеспечивается отечественным селекционным материалом³.

Сортовые ресурсы ежегодно пополняются благодаря работе селекционно-семеноводческих центров. Направления селекции мягкой яровой пшеницы в ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока определены запросами региональных товаропроизводителей, специфическими почвенно-климатическими условиями, видовым и расовым составом патогенов. Приоритет получает селекция на адаптивность к контрастным, прежде всего, экстремальным погодным условиям. За два десятка лет создано более 10 сортов, обладающих высоким потенциалом урожайности и качеством зерна. Результатом последних лет стало внесение в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию на территории России, сортов мягкой яровой пшеницы Награда [7] и Темп.

Цель исследований – оценка нового сорта мягкой яровой пшеницы Темп, созданного в ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, по хозяйственно ценным признакам, адаптивным свойствам и устойчивости к стрессовым факторам внешней среды в условиях Кировской области.

Научная новизна – создание нового среднеспелого высокопродуктивного сорта мягкой яровой пшеницы Темп, отвечающего требованиям современного производства, главными достоинствами которого являются высокая генетическая гибкость, комплексная устойчивость к болезням, улучшенные показатели качества зерна, толерантность к загущению.

Материал и методы. Изучение сорта Темп (селекционная линия Т-141) проводили в питомниках конкурсного сортоиспытания (КСИ) по Методике государственного сортоиспытания⁴ на опытных полях ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока в период с 2018 по 2024 г. Стандартом служил среднеспелый сорт Каменка (ФГБНУ «Верхневолжский ФАНЦ», РУП «НПЦ НАН Беларуси по земледелию»).

Опытные поля расположены в центральной части Кировской области (г. Киров, с. Красное), являющейся частью Северо-Восточной зоны Европейской территории России.

¹Кулистикова Т. Агроинвестор. 8 января 2025. Экспорт зерна из России в 2024 году превысил 71 млн тонн. [Электронный ресурс]. URL: <https://agroinvestor.ru/markets/news/43563-export-zerna-iz-rossii-v-2024-godu-prevysil-71-mln-tonn/?yscyd=m8cn3pt0ss894791962> (дата обращения: 13.03.2025)

²Кулистикова Т. Агроинвестор. 4 февраля 2023. Агросектор снова переписали. Какие тенденции выявила сельскохозяйственная микроперепись. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.agroinvestor.ru/opinion/article/39713agrosektor-snova-perepisali-kakie-tendentsii-vyyavila-selskohozyaystvennaya-mikroperepis/> (дата обращения: 21.04.2025)

³98% возделываемой в России пшеницы обеспечено отечественным селекционным материалом. Портал «Научная Россия». [Электронный ресурс] URL: <https://scientificrussia.ru/articles/98-vozdelываемoj-v-rossii-psenicy-obepeceno-otecestvennym-selekcionnym-materialom> (дата обращения: 22.04.2025)

⁴Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып.1. Общая часть. М., 2019. 329 с.

Климат зоны умеренно-континентальный с выраженной сезонностью в календарных годовых циклах. У выращиваемых здесь культур период активного роста не превышает 120 суток. Суммы осадков в летние месяцы составляют 60 мм и более, но их количество в течение вегетационного периода распределяется неравномерно: количество засушливых дней может доходить до 35. Согласно гидротермическому коэффициенту (ГТК)⁵ за май – август типичные для зоны метеоусловия сложились в 2018, 2019, 2020, 2022 и 2023 гг. (ГТК – 1,20...1,44), недостаток влаги отмечали в 2021 и 2024 гг. (ГТК – 0,72 и 1,07).

Почвы дерново-подзолистые средне-суглинистые, малоплодородные: содержание гумуса – 2,0 % (по методу Тюрина); подвижного фосфора – 148–157 мг/кг почвы; подвижного калия – 127–140 мг/кг почвы (по методу Кирсанова); рН_{сол} – 4,8 единиц. Опыт закладывали в 4-кратном повторении на делянках площадью 11,2 м². Предпосевная обработка включала ранневесеннее боронование, внесение минеральных удобрений (N₄₅P₄₅K₄₅ кг/га д. в.) и культивацию. Посев осуществляли пакетной сеялкой ССФК-6 с нормой высева 6 млн всхожих зерен/га. Уборочные работы проводили вручную и с помощью комбайна Сампо-130 в фазу полной спелости. В течение вегетации осуществляли фенологические наблюдения, проводили учеты головнёвых⁶, ржавчинных, мучнисто-росяных⁷, септориозных⁸ и фузариозных⁹ болезней. Эпифитотийное развитие листовых патогенов отмечали в 2023 году.

Из показателей качества зерна определяли натуру, стекловидность, содержание белка и клейковины. Технологическую оценку зерна выполняли в аналитической лаборатории ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока. Содержание

белка определяли с помощью ИК-анализатора «Инфраскан-4200» («ЭКАН», Россия) после измельчения зерна на лабораторной мельнице «Вьюга-3М», содержание и качество клейковины – с помощью системы Glutomatic производства Perten Instruments. Оценку хлебопекарных свойств сортов проводили по методике, рекомендованной Госкомиссией РФ¹⁰.

Статистическую обработку данных выполняли методом описательной статистики с использованием пакета программ Microsoft Office Excel 2016. Для всех количественных признаков вычисляли среднее арифметическое значение и вариабельность. Отличия от стандарта оценивали на уровне значимости $p \leq 0,05$. Стрессоустойчивость определяли по А. А. Rossielle, J. Hemblin в изложении А. А. Гончаренко [8]. Расчет параметров пластичности, адаптивности и стабильности проводили по В. А. Зыкину¹¹, Э. Д. Неттевичу с соавт.¹².

Результаты и их обсуждение. В 2025 году в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию по Северному экономическому региону, внесен среднеспелый высокопродуктивный сорт мягкой яровой пшеницы Темп. Назначение нового сорта – использование на зернофураж и продовольственные цели.

Сорт Темп создан методом внутривидовой гибридизации с последующим двукратным индивидуальным отбором из гибридной популяции Симбирцит (Ульяновский НИИСХ) × [(Рено (Норвегия) × Приокская (ФИЦ «Немчиновка»)) × Саратовская 42 (ФАНЦ Юго-Востока)]. Основные достоинства нового сорта: высокая потенциальная урожайность, комплексная устойчивость к болезням, высокое качество зерна (ценная пшеница).

⁵Селянинов Г. Т. О сельскохозяйственной оценке климата. Труды по сельскохозяйственной метеорологии. 1928;20:165–177.

⁶Кривченко В. И. Изучение устойчивости зерновых культур и расового состава возбудителей головнёвых болезней: методические указания. Л., 1978. 107 с.

⁷Гешеле Э. Э. Методическое руководство по фитопатологической оценке зерновых культур. Одесса, 1971. 178 с.

⁸Пыжиков Г. В., Санина А. А., Супрун Л. М., Курахтанова Т. И., Гогаева Т. И., Мепаришвили С. У. и др. Методы оценки устойчивости селекционного материала и сортов пшеницы к септориозу. М., 1989. 43 с.

⁹Шешегова Т. К., Кедрова Л. И. Методические рекомендации по созданию искусственных инфекционных фонов и оценке озимой ржи на устойчивость к фузариозным болезням. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2003. 30 с.

¹⁰Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур: технологическая оценка зерновых, крупяных и зернобобовых культур. М., 1988. 121 с.

¹¹Зыкин В. А. Параметры экологической пластичности сельскохозяйственных растений, их расчет и анализ: методические рекомендации. Новосибирск, 1984. 24 с.

¹²Неттевич Э. Д., Моргунов А. И., Максименко М. И. Повышение эффективности отбора яровой пшеницы на стабильность, урожайность и качество зерна. Вестник сельскохозяйственной науки. 1985;(1):66–73.

Первое скрещивание проведено в 1994 г., второе – в 1996 г., третье – в 2008 г. Элитное растение под номером П-252 выделено из гибридной популяции F₂ в 2010 г. Малое (предварительное) станционное испытание линии П-252 проходило в 2011–2013 гг. В 2013 г. в питомнике предварительного сортоиспытания после индивидуального отбора одному из лучших растений был присвоен номер Т-141. Малое станционное испытание селекционная линия Т-141 проходила в 2014–2017 гг., конкурсное сортоиспытание – в 2018–2021 гг. В 2022 г. сорт мягкой яровой пшеницы Темп передали на государственное сортоиспытание по Северному (I), Северо-Западному (II) и Волго-Вятскому (IV) регионам, до 2024 г. он оставался объектом изучения в питомнике КСИ

Разновидность – *lutescens*. Колос цилиндрической формы, средней длины и плотности с короткими остевидными отростками на верхушке. Плечо нижней колосковой чешуи средней ширины, закругленное-прямое, зубец короткий, слегка изогнут, опушение внутренней стороны чешуи слабое. Зерновка овальной формы, окрашенная, крупная: масса 1000 семян составляет

39,8 г; натурная масса – 766 г/л; стекловидность – 60 %. Содержание белка и клейковины соответственно 12,3 и 28,7 %.

Тип куста прямостоячий. Растение средней длины (90 см) с вертикальным (эректоидным) расположением листьев. В благоприятных условиях длина может достигать 115 см. Соломина в поперечном сечении выполнена слабо, прочная, устойчивая к полеганию (7-9 баллов по 9-балльной шкале). Лист со слабо выраженной антоциановой окраской ушек, восковой налет на влагалище выражен средне.

Сорт среднеспелый: от всходов до восковой спелости проходит в зависимости от метеорологических вегетационного периода от 74 до 105 дней. Фазы колошения и созревания наступают на сутки позднее стандарта Каменка.

Урожайность зерна за годы изучения сильно варьировала: размах изменчивости признака у стандарта составил 1,57...3,79 т/га, у нового сорта – 1,61...4,36 т/га. Средняя урожайность сорта Темп в питомнике КСИ составила 3,01±0,35 т/га, стандарта Каменка – 2,80±0,29 т/га. Сравнительная оценка урожайности зерна двух сортов представлена на рисунке.

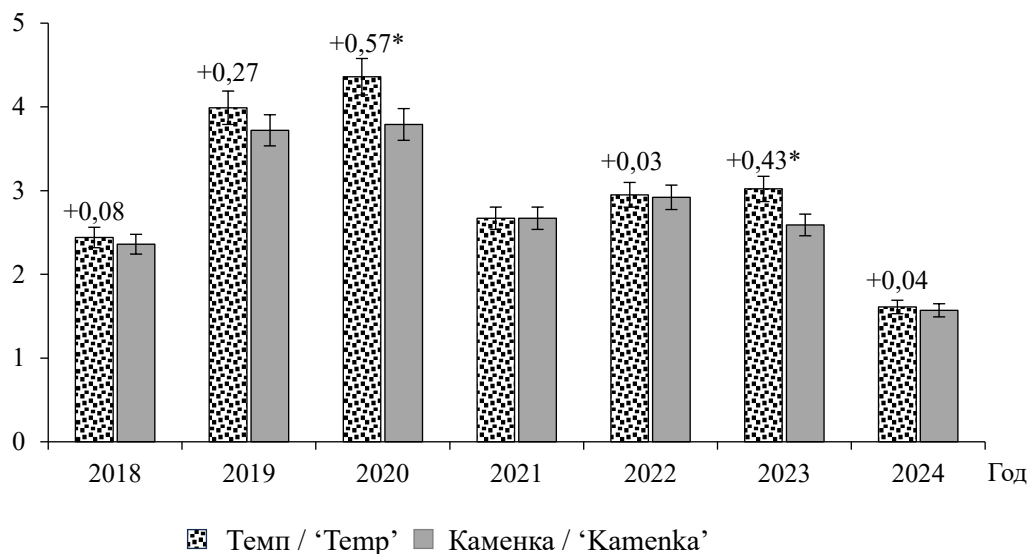


Рис. Сравнительная урожайность зерна сортов мягкой яровой пшеницы Темп и Каменка (стандарт) за годы конкурсного сортоиспытания, т/га: на рисунке цифрами указана прибавка к стандарту, планка указывает стандартное отклонение

Fig. Comparative grain yield of 'Temp' and 'Kamenka' (st.) spring bread wheat cultivars over the years of competitive variety testing, t/ha: the digits indicate the increase to the standard, the bar indicates the standard deviation

В 2018 г. отмечали слабое варьирование среднего значения урожайности: у сорта Темп – 4,0 %, у сорта Каменка – 3,8 %. В период с 2019 по 2023 г. коэффициент вариации признака не превышал 14,7 % у нового сорта и 11,4 % у стандарта. В условиях 2024 г. область варьирования урожайности сортов была наибольшей

за весь период исследований – 24,0 и 26,2 % соответственно.

По результатам госсортоиспытания на сортоучастках Кировской области (Зуевский, Слободской, Яранский) в 2023-2024 гг. средняя урожайность зерна сорта Темп составила 3,70±0,28 т/га, стандарта Каменка – 3,49±0,29 т/га.

Считается, что эффективность использования сортов в производстве можно оценить путем определения их адаптивных реакций на меняющиеся условия среды [9]. Широкий спектр показателей позволяет дать объективную характеристику стабильности сорта в различных средовых условиях и отклика на улучшение условий возделывания [10]. Важным этапом в алгоритме подсчета адаптивных свойств является оценка стрессоустойчивости ($Y_{min} - Y_{max}$). Чем меньше разрыв урожайности, тем выше устойчивость и шире интервал приспособительных возможностей сорта [11]. Строго лимитирующим урожайность зерна фактором стала засуха 2024 г., а наиболее благоприятные условия для формирования признака сложились в 2020 г. Индекс стрессоустойчивости сорта Темп составил -2,8, стандарта Каменка – -2,2. Новый сорт отличился высоким значением индекса генетической гибкости $((Y_{max} + Y_{min})/2)$: величина признака составила 3,0 (у стандарта 2,7). Исходя из значения коэффициента отзыв-

чивости, рассчитанного по методу В. А. Зыкина (Y_{max}/Y_{min}), сорт Темп хорошо реагировал на благоприятные условия выращивания: $K_p = 2,7$ против 2,4 у стандарта Каменка. Таким образом, новый сорт проявил себя как высокопластичный, отзывчивый на условия среды и рекомендован к возделыванию с применением интенсивных агротехнологий.

Среднее значение признака и средовая чувствительность, находясь под самостоятельным генетическим контролем, являются относительно независимыми величинами [7], следовательно, наибольшую ценность представляют сорта, сочетающие высокие средние значения хозяйственно ценных признаков с их низкой изменчивостью. С другой стороны, стабильность урожайности, как результирующего признака, определяется высокой пластичностью ее компонентов. В таблице 1 представлены средние значения и вариабельность хозяйственно ценных признаков нового сорта и сорта-стандарта.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика хозяйственно ценных признаков сортов мягкой яровой пшеницы Темп и Каменка за годы конкурсного сортоиспытания (среднее за 2018–2024 гг.) /
Table 1 – Comparative characteristics of economically valuable traits of ‘Temp’ and ‘Kamenka’ spring bread wheat cultivars over the years of competitive variety testing (2018–2024)

Признак / Trait	Темп / ‘Temp’		Каменка, ст. / ‘Kamenka’, st.	
	среднее значение / average value	CV, %	среднее значение / average value	CV, %
Полевая всхожесть, % / Field germination, %	77,8	26,6	77,0	24,0
Число продуктивных стеблей, шт/м ² / Number of productive stems, pcs/m ²	472,6	15,5	473,1	17,9
Высота растения, см / Height of the plant, cm	90,3	15,7	78,9	19,6
Устойчивость к полеганию, балл / Resistance to lodging, point	8,0	14,4	7,5	23,5
Продуктивная кустистость, шт. / Productive bushiness, pcs.	1,06	6,5	1,05	4,7
Длина колоса, см / Ear length, cm	7,20	11,9	7,36	10,3
Число колосков в колосе, шт. / Number of spikelets per ear, pcs.	14,1	14,4	12,7	10,9
Число зерен в колосе, шт. / Number of grains per ear, pcs.	27,30	16,7	24,25	14,6
Масса зерна с колоса, г / Grain weight per ear, g	1,10	25,2	1,06	21,4
Масса зерна с растения, г / Grain weight per plant, g	1,14	24,7	1,09	22,5
Масса 1000 зерен, г / Weight of 1000 grains, g	39,84	10,0	42,96	9,0
Натура зерна, г/л / Grain size, g/l	766,3	3,3	769,1	3,9
Содержание белка, % / Protein content, %	12,3	10,4	12,1	6,4
Содержание клейковины, % / Gluten content, %	28,7	24,9	29,7	16,9
Глютен-индекс, ед. / Gluten index, un.	63,6	26,7	65,3	15,1

Согласно данным таблицы 1, новый сорт превосходит стандарт по многим признакам, например по высоте, являясь при этом более устойчивым к полеганию, по элементам продуктивности главного колоса и растения. Сорт Темп обладает лучшей, чем сорт Каменка, способностью компенсировать недостаточную сформированность одних признаков (например, длины колоса) развитием других (например, числа колосков в колосе), на что указывают более высокие значения коэффициента вариации.

Основным назначением пшеницы мягкой является получение муки для производства хлебобулочных изделий. Кроме того, зерно и отруби широко используют для производства животных кормов. Выход муки зависит от натурной массы зерна, а показатель пищевой и кормовой ценности – от содержания белка.

Количество и качество клейковины – это важные критерии при определении класса зерна пшеницы [12]. По технологическим показателям (табл. 1) мягкая яровая пшеница Темп относится к ценным по качеству сортам.

Селекция на устойчивость к патогенам способствует решению задач по улучшению фитосанитарного состояния посевов, защиты окружающей среды от вредных химикатов, обеспечения населения безопасными и качественными продуктами [13]. К тому же возделывание устойчивых сортов повышает рентабельность зернопроизводства. На естественном фоне, но в провокационных условиях развития патогенов *Puccinia* spp., *Blumeria* spp. и *Septoria* spp., сорт Темп слабо поражен бурой ржавчиной и мучнистой росой, характеризовался средней восприимчивостью к септориозу листьев (табл. 2).

Таблица 2 – Иммунологическая характеристика сортов мягкой яровой пшеницы Темп и Каменка (min...max значения за 2021–2024 гг.) /

Table 2 – Immunological characteristics of 'Temp' and 'Kamenka' spring bread wheat cultivars (min...max values for 2021–2024)

Болезнь / Plant disease	Темп / 'Temp'	Каменка, см. / 'Kamenka', st.	Примечание / Note
Естественный фон / Natural background			
Септориоз листьев, степень поражения / Leaf septoria, degree of damage, %	5,0...40,0	5,0...23,8	16–25 % – умеренная устойчивость / moderate stability; 25–65 % – восприимчивость / susceptibility
Бурая ржавчина, степень поражения / Leaf rust, degree of damage, %	3,5...12,0	11,0...27,0	0–20 % – высокая устойчивость / high stability;
Мучнистая роса, степень поражения / Powdery mildew, degree of damage, %	9,0...21,8	7,0...16,7	21–40 % – умеренная устойчивость / moderate stability
Искусственный фон / Artificial background			
Корневые гнили, % развития / Root rots, % of development	2,1...9,8	4,5...11,3	менее 16 % – высокая устойчивость / high stability
Пыльная головня, % поражения / Loose smut, % of damage	3,6...23,9	42,1...69,1	5–25 % – слабая восприимчивость / low susceptibility; более 50 % – сильная восприимчивость / strong susceptibility
Твердая головня, % поражения / Hard firebrand, % of damage	0,0...20,0	4,5...16,5	менее 10 % – практическая устойчивость / practical sustainability; 10–25 % – слабая восприимчивость / low susceptibility
Фузариоз колоса, % поражения / Fusarium ear blight, % of damage	22,5...42,0	27,5...65,0	20–40 % – слабая восприимчивость / low susceptibility; 41–60 % – умеренная восприимчивость / moderate susceptibility; 61–80 % – восприимчивость / susceptibility

На искусственных инфекционных фонах новый сорт превосходил стандарт по устойчивости к корневым гнилям, проявлял слабую восприимчивость к возбудителям фузариоза колоса, пыльной и твердой головни.

Агротехника возделывания сорта Темп подразумевает обязательное протравливание семян перед посевом. Лучшим сроком сева является 1 декада мая, но в связи с тем, что сорт среднеспелый, допускаются более ранние сроки.

Посев лучше проводить по чистому пару. Хорошие предшественники – многолетние травы, озимая рожь, горох, пропашные культуры.

Заключение. Новый сорт мягкой яровой пшеницы Темп соответствует требованиям региональных товаропроизводителей: среднеспелый; обладает высокой урожайностью (до 3,7 т/га с прибавкой к стандарту 0,2 т/га), высокой технологичностью (не полегает, хорошо вымолачивается); адаптирован к агроэкологи-

ческим условиям Кировской области. Сорт положительно отзывается на благоприятные условия выращивания и рекомендуется к возделыванию по интенсивным и полунтенсивным технологиям. Главные достоинства сорта Темп, в сравнении со стандартом Каменка – высокая генетическая гибкость, высокое качество зерна, комплексная устойчивость к болезням. Благодаря эректоидному расположению листьев, сорт характеризуется толерантностью к загущению.

Список литературы

1. Шкляров А. П. Аграрное производство в условиях глобального изменения климата. Аграрная экономика. 2021;(6):85–94. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46380666> EDN: TDERTG
2. Сафронова И. В., Аниськов Н. И. Значимость комплексной оценки селекционных индексов и параметров стрессоустойчивости озимой ржи. Аграрный вестник Урала. 2022;(6):16–21. DOI: <https://doi.org/10/32417/1997-4868-2022-06-16-26> EDN: EZIYRE
3. Манукян И. Р. Сравнительная оценка адаптивности сортов озимой пшеницы к условиям предгорной зоны Центрального Кавказа. Аграрный вестник Урала. 2025;25(2):164–175. DOI: <https://doi.org/10/32417/1997-4868-2025-25-02-164-175> EDN: YPWVZX
4. Грабовец А. И., Бирюков К. Н. Роль сорта в стабилизации производства зерна в широком диапазоне агроклиматических факторов. Земледелие. 2021;(5):41–45. DOI: <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2021-5-41-45> EDN: PFXHO
5. Pixley K. V., Cairns J. E., Lopez-Ridaura S., Ojiewo C. O., Dawud M. A., Drabo I. et al. Redesigning crop varieties to win the race between climate change and food security. Molecular Plant. 2023;16(10):1590–1611. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molp.2023.09.003>
6. Магомедов Н. Р., Магомедова Д. С., Ахмедова С. О., Магомедов Н. Н. Адаптивная агротехнология возделывания новых сортов озимой пшеницы на территории Терско-Сулакской подпровинции. Юг России: экология, развитие. 2017;12(2):171–179. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29453448> EDN: YUNTXF
7. Амунова О. С., Волкова Л. В., Харина А. В. Новый сорт мягкой яровой пшеницы Награда для возделывания в Волго-Вятском регионе. Пермский аграрный вестник. 2023;(4(44)):27–33. DOI: https://doi.org/10.47737/2307-2873_2023_44_27 EDN: PLJXFB
8. Гончаренко А. А. Об адаптивности и экологической устойчивости сортов зерновых культур. Вестник РАСХН. 2005;(6):49–53.
9. Новохатин В. В., Шеломенцева Т. В., Драгавцев В. А. Новый комплексный подход к изучению динамики повышения адаптивности и гомеостатичности у сортов мягкой яровой пшеницы (на примере длительности истории селекции в Северном Зауралье). Сельскохозяйственная биология. 2022;57(1):81–97. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.1.81rus> EDN: DAYGED
10. Барковская Т. А., Гладышева О. В., Кокорева В. Г. Оценка адаптивности и потенциальной продуктивности яровой мягкой пшеницы в условиях Рязанской области. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(1):58–65. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.1.58-65> EDN: FTMXHZ
11. Аниськов Н. И., Сафронова И. В. Оценка показателей стрессоустойчивости, стабильности и пластичности сортов озимой ржи по массе 1000 зерен. Вестник КрасГАУ. 2020;(9):27–35. DOI: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-9-27-35> EDN: ATXZHF
12. Мелешкина Е. П. Современные аспекты качества зерна пшеницы. Аграрный вестник Юго-Востока. 2009;(3):4–7. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26725175> EDN: WMVMVL
13. Афанасенко О. С. Проблемы создания сортов сельскохозяйственных культур с длительной устойчивостью к болезням. Защита и карантин растений. 2010;(3):4–9. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13065908> EDN: KZXYRF

References

1. Shklyarov A. P. Agricultural production in the context of global climate change. *Agrarnaya ekonomika* = Agrarian Economics. 2021;(6):85–94. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46380666>
2. Safronova I. V., Aniskov N. I. The importance of a comprehensive assessment of breeding indices and stress resistance parameters of winter rye varieties. *Agrarnyy vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals. 2022;(6):16–21. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10/32417/1997-4868-2022-06-16-26>
3. Manukyan I. R. Comparative assessment of the adaptability of winter wheat varieties to the conditions of the foothill zone of the Central Caucasus. *Agrarnyy vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals. 2025;25(2):164–175. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10/32417/1997-4868-2025-25-02-164-175>

4. Grabovets A. I., Biryukov K. N. Role of the variety in the stabilization of grain production in a wide range of agroclimatic factors. *Zemledelie*. 2021;(5):41–45. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/0044-3913-2021-5-41-45>
5. Pixley K. V., Cairns J. E., Lopez-Ridaura S., Ojiewo C. O., Dawud M. A., Drabo I. et al. Redesigning crop varieties to win the race between climate change and food security. *Molecular Plant*. 2023;16(10):1590–1611. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molp.2023.09.003>
6. Magomedov N. R., Magomedova D. S., Akhmedova S. O., Mago-medov N. N. Adaptive agro-technology of farming new winter wheat variety in the Tersko-Sulak territory. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie* = South of Russia: ecology, development. 2017;12(2):171–179. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29453448>
7. Amunova O. S., Volkova L. V., Kharina A. V. A new variety of soft spring wheat 'Nagrada' for cultivation in the Volga-Vyatka region. *Permskiy agrarnyy vestnik* = Perm Agrarian Journal. 2023;(4(44)):27–33. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.47737/2307-2873_2023_44_27
8. Goncharenko A. A. On adaptivity and ecological resistance of grain crop varieties. *Vestnik RASKhN*. 2005;(6):49–53. (In Russ.).
9. Novokhatin V. V., Shelomentseva T. V., Dragavtsev V. A. A novel integrative approach to study the dynamics of an increase in common spring wheat adaptivity and homeostaticity (on the example of breeding programs in the northern Trans-Ural). *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2022;57(1):81–97. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2022.1.81rus>
10. Barkovskaya T. A., Gladysheva O. V., Kokoreva V. G. Assessment of adaptability and potential productivity of spring soft wheat in the conditions of the Ryazan region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(1):58–65. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.1.58-65>
11. Aniskov N. I., Safronova I. V. The assessment of the indicators of stress resistance, stability and plasticity of winter rye varieties according to the "mass of 1000 grains". *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU. 2020;(9):27–35. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2020-9-27-35>
12. Meleshkina E. P. Modern aspects of wheat grain quality. *Agrarnyy vestnik Yugo-Vostoka* = Agrarian Reporter of South-East. 2009;(3):4–7. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26725175>
13. Afanasenko O. S. Problems to create grades of agricultural crops with long stability to diseases. *Zashchita i karantin rasteniy*. 2010;(3):4–9. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13065908>

Сведения об авторе

✉ **Амунова Оксана Сергеевна**, кандидат биол. наук, научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», ул. Ленина, 166 а, Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8560-840X>, e-mail: yuzhnoe5@mail.ru

Information about the author

✉ **Oksana S. Amunova**, PhD in Biology, researcher, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, 166a, Lenin str., Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8560-840X>, e-mail: yuzhnoe5@mail.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author



Изучение сортов смородины красной по признакам мелко- и малосемянности

© 2025. О. Д. Голяева✉, А. В. Алпатова

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур», Орловская область, Российская Федерация

Цель исследований – выявить мелко- и (или) малосемянные сорта смородины красной селекции Всероссийского НИИ селекции плодовых культур для промышленного использования и в качестве источников данных признаков для селекции. Работу выполняли в период 2020–2023 гг. в условиях Орловской области. В задачи входило изучение 21 сорта смородины красной по следующим показателям: число семян в ягоде; масса 1000 семян; доля семян от массы ягоды. В результате исследования среди изучаемых сортов смородины красной не выявлено образцов, совмещающих мелко- и малосемянность в одном генотипе. Сорта Подарок победителям, Орловчанка, Подарок лета, Валентиновка являются источниками малосемянности (3...4 шт. семян в ягоде) с низкой долей (3,8...4,1 %) от массы ягоды. Мелко-семянностью (масса 1000 семян до 5 г) и низкой долей семян от массы ягоды характеризуется сорт Премьера, который можно использовать в селекции как источник этих признаков. Сорта Асора и Ася со средней массой семян и их средним количеством имеют низкий удельный вес семян от массы ягоды, что является важным показателем для переработки. Установлена положительная корреляция между количеством семян и массой ягоды. Высокий коэффициент корреляции ($r = 0.999...0.997$) у сортов Нива, Орловская звезда, Ася, Дана. Слабая степень корреляции ($r = 0.480$) между данными признаками отмечена у сорта Осиповская. Образцы с умеренной силой корреляции между количеством семян и массой ягоды представляют интерес в селекции для получения крупноплодных малосемянных сеянцев.

Ключевые слова: *Ribes rubrum* L., биоресурсная коллекция, сортообразец, ягоды, семена, масса

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур» (тема № FGZS-2025-0009).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Голяева О. Д., Алпатова А. В. Изучение сортов смородины красной по признакам мелко- и малосемянности. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(4):781–787. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.781-787>

Поступила: 04.03.2025

Принята к публикации: 04.08.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

Study of red currant cultivars based on the characteristics of small-sized seeds and a small number of seeds

© 2025. Olga D. Golyaeva✉, Anastasia V. Alpatova

Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding, Orel region, Russian Federation

The goal of the study was to identify red currant cultivars bred by the Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding having small-sized seeds and a small number of seeds for industrial use and as sources of these traits for breeding. The work was carried out in 2020–2023 in the Orel region. Twenty-one red currant cultivars were studied according to the following indicators: the number of seeds in a berry; the weight of 1000 seeds and the proportion of seeds in the berry weight. As a result of the study, no samples combining small-sized seeds and small amounts of seeds in one genotype were found among the studied red currant cultivars. ‘Podarok Pobeditelyam’, ‘Orlovchanka’, ‘Podarok Leta’ and ‘Valentinovka’ red currants are the sources of small amounts of seeds (3...4 seed pcs in the berry) with low proportion (3.8...4.1 %) in the berry weight. ‘Premiera’ is characterized by small-sized seeds (1000 seeds weighing up to 5 g) and a low proportion of seeds in the berry weight; this cultivar can be used in breeding as a source of these characteristics. ‘Asora’ and ‘Asya’ with an average seed weight and an average number of seeds have a low specific gravity of seeds to the berry weight, which is an important indicator for processing. A positive correlation has been determined between the number of seeds and the berry weight. ‘Niva’, ‘Orlovskaya Zvezda’, ‘Asya’ and ‘Dana’ have a high correlation coefficient ($r = 0.999...0.997$). A weak degree of correlation ($r = 0.480$) between these characteristics is noted in ‘Osipovskaya’. The samples with a moderate correlation between the number of seeds and the weight of the berry are of interest in breeding for large-fruited seedlings with a small number of seeds.

Keywords: *Ribes rubrum* L., bio resource collection, genotype sample, berries, seeds, weight

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 Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding (theme No. FGZS-2025-0009).

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

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

For citation: Golyaeva O. D., Alpatova A. V. Study of red currant cultivars based on the characteristics of small-sized seeds and a small number of seeds. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):781–787. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.781-787>

Received: 04.03.2025

Accepted for publication: 04.08.2025

Published online: 29.08.2025

Высокие потребительские качества ягод красной смородины наряду с такими показателями, как десертный вкус, привлекательный внешний вид, высокое содержание биологически активных веществ определяет также количество семян в ягодах, их масса и доля [1].

Исследования по изучению семян у представителей рода *Ribes* L. в основном относятся к изучению морфологических признаков с целью установления внутривидовой систематики рода [2]. Работы по изучению мелко- и малосемянности ягод смородины и крыжовника немногочисленны. Г. А. Атрошенко с коллегами при хозяйственно-биологической оценке сортов в условиях Ленинградской области, как показатель качества ягод, рассматривали количество содержащихся в них семян. Были выделены мелкосемянные сорта крыжовника (менее 15 семян в ягоде): Английский желтый, Гаркате, Садко, Серенада, Сливовый, Эридан [3]. В условиях Сибири А. А. Кузьминой установлено, что на изменчивость показателя «количество семян в ягоде» крыжовника большое влияние оказывают генетические особенности (31,2 %), достоверной связи с метеоусловиями вегетационного периода у большинства сортообразцов не выявлено [4].

Ряд исследователей установили у сортов смородины черной высокую положительную зависимость количества семян в ягоде и ее массы [5, 6]. Проведена оценка фенотипического разнообразия механического состава ягод сортов смородины черной и определены источники его варьирования [7].

Учёные НИИ садоводства Сибири имени М. А. Лисавенко (г. Барнаул) создали сорт чёрной смородины Бессемянная с полным отсутствием семян (есть только их зачатки). До сих пор такой сорт не удавалось получить селекционерам ни в одной стране мира. Ягоды весом 5-6 г с высоким содержанием витамина С (141 мг/100 г). На вкус кисло-сладкие с приятным ароматом. Урожайность с куста 3 кг и более. Сорт отличается повышенной устойчивостью к почковому клещу, тле и к самым распространённым заболеваниям: мучнистой росе, антракнозу, септориозу [8].

Изучая географические расы смородины колосистой – *Ribes spicatum* Robson, В. Д. Федоровский установил, что количество семян и диаметр ягоды имеют положительный коэффициент корреляции [9]. Исследования механического состава ягод (число семян, масса 1000 семян и доля семян от массы ягоды) у сортов

и перспективных гибридов смородины красной проводили в лесостепи Приобья (Новосибирская область) [10].

Одним из направлений современной селекции красной смородины является получение сортов, содержащих в ягодах малое количество мелких семян с мягкой оболочкой, чтобы доля семян в ягодах была незначительной. В Программе и методике селекции плодовых, ягодных и орехоплодных культур¹, изданной Всероссийским НИИ садоводства в 1980 г., уже стояла задача создания сортов смородины красной с небольшим количеством мелких семян в ягоде. Целенаправленной селекции на данные признаки не вели.

Это направление актуально для ягод десертных сортов, предназначенных для употребления в свежем виде, и для технических сортов.

При получении сока значительную часть сырья составляют отходы (выжимки), которые быстро портятся, и требуется немедленная их переработка для получения дополнительной продукции. Семена из выжимок используют для получения муки, масла, экстрактов и других инновационных продуктов. В основном работают с семенами облепихи, малины, винограда [11]. Для смородины красной разработана рецептура мучного кондитерского изделия с применением высушенных и измельченных выжимок [12].

Размножение смородины красной в промышленных масштабах осуществляется вегетативным способом, поэтому высокая семенная продуктивность важна только для селекционной работы.

Цель исследований – выявить мелко- и (или) малосемянные сорта смородины красной селекции Всероссийского НИИ селекции плодовых культур (ВНИИСПК) для промышленного использования и в качестве источников данных признаков в селекции.

Научная новизна – впервые в условиях Орловской области сорта смородины красной селекции ВНИИСПК изучали по признакам мелкосемянности и малосемянности, оказывающим влияние на качество ягодной продукции.

Материал и методы. Работу выполняли в 2020, 2022 и 2023 гг. на базе ВНИИСПК (Орловская область). Проводили изучение механического состава ягод 21 сорта смородины красной селекции ВНИИСПК – число семян в ягоде, масса 1000 семян и доля семян от массы ягоды. Для исследования брали по

¹Программа и методика селекции плодовых, ягодных и орехоплодных культур. Мичуринск, 1980. С. 211.

50 ягод каждого сорта, обрывая все ягоды с кисти. По средней массе ягоды сорта ранжировали на группы: мелкоплодные – до 0,45 г; со средней массой – 0,46...0,65 г; крупноплодные – более 0,65 г в соответствии с общепринятой методикой².

Семена выбирали, промывали от мякоти и высушивали. По количеству семян в плодах сорта разделяли на три группы: малосемянные (в ягоде до 5 шт. семян); среднесемянные (от 5,0 до 8 шт.); многосемянные (более 8 шт.). Образцы по массе 1000 семян и удельному весу семян от массы ягоды группировали на основании среднего многолетнего показателя по данной группе сортов. Статистическую обработку данных проводили с применением коэффициента вариации и корреляционного анализа в соответствии с методическими указаниями Б. А. Доспехова³ с помощью пакета программ Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение. Основным показателем товарных качеств ягод смородины красной является их масса. Определяли среднюю массу ягоды взятого образца (50 ягод) каждого сорта. Средняя масса ягоды по сортам изменялась от 0,79 г (сорт Нива) до 0,50 г (сорт Селяночка) (табл. 1). Согласно методике, в группу крупноплодных сортов вошли: Асора, Дар Орла, Мармеладница, Нива, Орловская звезда, Осиповская, Премьера, остальные – в группу со средней массой ягоды. Масса ягоды сильно зависит от погодных условий вегетации, 31,6 % фенотипического варьирования вызваны гидротермическими условиями в период цветения и формирования ягод [13]. Стабильной массой ягоды по годам выделился сорт Устина (CV – 1,85 %), а также Баяна, Вика, Газель. Восемь сортов (38,1 %) имели высокую изменчивость признака, максимальное значение коэффициента вариации – у сорта Мармеладница.

Около половины изучаемых сортов характеризовались средней степенью изменчивости массы ягоды по годам.

Количество семян в ягоде по сортам изменялось от 3,2–3,5 шт. у сортов Подарок лета, Валентиновка, Устина до 9,0 шт. – сорта Нива (табл. 1). В группу малосемянных (в ягоде до 5 штук семян) вошли 6 сортов: Валентиновка, Подарок лета, Подарок победителям, Орловчанка, Дана, Дар Орла, из них Валентиновка, Подарок победителям с низким коэффициентом

вариации признака по годам. По результатам исследований в условиях Белгородской области, сорт Валентиновка также выделяется, как малосемянный [14]. К многосемянным (более 8 семян в ягоде) отнесен сорт Нива с высокой изменчивостью признака по годам. Много семян в ягоде у сортов Газель, Мармеладница, Роза (7,7...8,0 шт.). Большая часть сортов характеризовалась средним количеством семян. Признак «число семян в ягоде» имеет высокую изменчивость по годам, по данной группе сортов коэффициент вариации составил 29,0 %, наивысший – 55,6 % (Роза).

Для смородины черной установлена положительная корреляционная связь между массой ягоды и количеством семян ($r = 0,72$), в пределах каждого отдельно взятого сорта величина коэффициента корреляции значительно выше – 0,890...0,926 [6].

Для смородины красной выявлена та же тенденция. Коэффициент корреляции между количеством семян и массой ягоды по изучаемой группе сортов составил 0,812, по генотипам изменялся от 0,999 до 0,480. В более крупной ягоде содержится большее количество семян, степень корреляции зависит от генотипических особенностей, у одних сортов коэффициент близок к единице, у других связь между признаками выражена в средней степени. Образцы с умеренной силой корреляции между данными признаками в селекции представляют больший интерес для получения крупноплодных малосемянных сеянцев.

Ученые Великобритании А. Дж. Эббот, Г. Р. Бест и Р. А. Уэбб (А. J. Abbott, G. R. Best and R. A. Webb) [15] выявили, что размер ягод у клубники определяется двумя факторами, а именно количеством семян и величиной расширения поверхности (масса мякоти на один орешек). Р. А. Уэбб (R. A. Webb) [16] делает вывод, что на размер ягод черной смородины, как и у клубники, влияет количество семян, которое определяет максимальный размер ягоды. Благоприятные условия во время цветения и оплодотворения семяпочек (проксимальные цветки смородины черной содержат в среднем 180, дистальные цветки до 100 семязачатков) способствуют завязыванию большого количества семян и формированию крупных ягод. Если образуется достаточное количество семян, ягода

²Князев С. Д., Баянова Л. В. Смородина, крыжовник и их гибриды. Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур. Под общ. ред. Е. Н. Седова, Т. П. Огольцовой. Орел: ВНИИСПК, 1999. с 351–374.

³Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

способна к полноценному развитию при наличии подходящих погодных и агротехнических условий. Плохое опыление семяпочек, приводящее к уменьшению количества семян, может ограничить размер плодов. Согласно исследованиям В. Ф. Северина и В. В. Кандауровой [5], способ опыления чёрной смородины влияет на завязываемость ягод, их массу и количество сформировавшихся в них семян. При свободном

опылении улучшается оплодотворение завязей, в ягодах образуется значительно больше семян, чем при самоопылении, увеличивается масса ягоды и, следовательно, урожайность. Это подтверждает преимущество многосортных посадок, где возможно перекрестное опыление, перед односортными, даже при высокой самоплодности сорта.

Таблица 1 – Масса ягоды и количество семян у сортов красной смородины (в среднем за 2020–2023 гг.) /
Table 1 – Berry weight and seed number of red currant cultivars (on average for 2020–2023)

<i>Copm/ Cultivar</i>	<i>Масса ягоды, г / Berry weight, g</i>	<i>CV, %*</i>	<i>Семян в ягоде, шт. / Seed number in berry, pcs.</i>	<i>CV, %</i>	<i>r**</i>
Асора / ‘Asora’	0,73±0,08	18,16	5,0±0,03	1,2	0,737
Ася / ‘Asya’	0,65±0,07	19,70	5,4±1,28	41,4	0,998
Баяна / ‘Bayana’	0,51±0,02	7,84	5,5±0,36	11,4	0,961
Белка / ‘Belka’	0,55±0,07	21,18	6,4±1,27	34,2	0,966
Валентиновка / ‘Valentinovka’	0,58±0,08	24,98	3,5±0,15	7,6	0,817
Вика / ‘Vika’	0,51±0,03	8,98	5,8±0,93	27,6	0,645
Газель / ‘Gazel’	0,62±0,02	6,07	7,7±1,68	37,6	0,838
Дана / ‘Dana’	0,59±0,05	14,50	4,4±0,87	34,3	0,997
Дар Орла / ‘Dar Orla’	0,68±0,06	14,80	4,6±0,68	25,7	0,976
Мармеладница / ‘Marmeladnitsa’	0,66±0,11	29,84	7,7±1,50	33,8	0,980
Нива / ‘Niva’	0,79±0,11	24,93	9,0±1,72	33,1	0,999
Огонек / ‘Ogonek’	0,61±0,06	16,51	5,2±0,70	23,3	0,682
Орловская звезда / ‘Orlovskaya Zvezda’	0,67±0,07	18,75	5,8±1,47	43,7	0,999
Орловчанка / ‘Orlovchanka’	0,55±0,06	20,25	3,9±0,75	33,3	0,629
Осиповская / ‘Osipovskaya’	0,67±0,06	15,79	5,1±0,55	18,6	0,480
Подарок лета / ‘Podarok Leta’	0,53±0,05	16,12	3,2±0,62	33,8	0,941
Подарок победителям / ‘Podarok Pobeditelyam’	0,55±0,04	13,56	4,1±0,09	3,8	0,756
Премьера / ‘Premiera’	0,67±0,08	21,53	6,0±1,55	45,0	0,569
Роза / ‘Roza’	0,64±0,1	26,03	8,0±2,57	55,6	0,876
Селяночка / ‘Selyanochka’	0,50±0,08	29,48	4,0±0,76	33,1	0,981
Устина / ‘Ustina’	0,54±0,01	1,85	3,5±0,59	30,0	0,640
Среднее / Average	0,61	17,66	5,4	29,0	0,812
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	0,13	-	2,2	-	-

*CV, % – коэффициент вариации признака; r** – коэффициент корреляции между массой ягоды и количеством семян /
 *CV, % – trait variation coefficient; r** – correlation coefficient between berry weight and number of seeds

При оценке потребительских качеств ягод важное значение играет не только количество семян, но и их величина.

Показатель массы 1000 семян находился в пределах от 4,42 до 7,65 г (табл. 2). В группу

мелкосемянных (масса 1000 семян до 5 г) вошли сорта: Вика, Премьера, Белка, Роза, Нива, Газель. На рисунке показана сравнительная величина семян сортов Премьера (4, 67 г) и Баяна (5,99 г).

Таблица 2 – Характеристика семян смородины красной (в среднем за 2020–2023 гг.) /
Table 2 – Red currant seeds characteristics (on average for 2020–2023)

<i>Copm / Cultivar</i>	<i>Масса 1000 семян, г / Weght of 1000 seeds, g</i>	<i>CV, %</i>	<i>Доля семян от массы ягоды, % / Seed proportion to the berry weight, %</i>	<i>CV, %</i>
Асора / 'Asora'	5,56±0,36	11,2	3,8±0,58	26,1
Ася / 'Asya'	5,17±0,35	11,6	4,1±0,48	20,1
Баяна / 'Bayana'	5,99±0,29	8,49	6,4±0,48	12,9
Белка / 'Belka'	4,70±0,40	14,71	5,4±0,95	30,4
Валентиновка / 'Valentinovka'	6,70±0,75	19,37	4,1±0,12	5,10
Вика / 'Vika'	4,42±0,26	10,30	5,0±0,73	25,5
Газель / 'Gazel'	4,99±0,35	12,26	6,0±0,93	27,1
Дана / 'Dana'	6,87±0,26	6,50	5,1±0,76	25,9
Дар Орла / 'Dar Orla'	6,94±0,23	5,80	4,6±0,39	14,9
Мармеладница / 'Marmeladnitsa'	7,65±0,28	6,25	8,9±0,64	12,6
Нива / 'Niva'	4,77±0,13	4,83	5,4±0,34	10,9
Огонек / 'Ogonek'	6,07±0,21	5,89	5,2±0,72	24,1
Орловская звезда / 'Orlovskaya Zvezda'	5,50±0,43	13,64	4,8±1,01	36,5
Орловчанка / 'Orlovchanka'	5,62±0,26	8,11	4,0±0,55	23,4
Осиповская / 'Osipovskaya'	5,90±0,31	9,20	4,5±0,35	13,5
Подарок лета / 'Podarok Leta'	6,76±0,20	5,16	4,0±0,58	24,8
Подарок победителям / 'Podarok Pobeditelyam'	5,23±0,40	13,39	3,9±0,54	24,0
Премьера / 'Premiera'	4,67±0,46	17,02	4,1±0,64	27,2
Роза / 'Roza'	4,72±0,22	8,14	5,6±1,15	35,5
Селяночка / 'Selyanochka'	6,50±0,58	15,37	5,2±0,58	19,1
Устина / 'Ustina'	6,52±0,26	6,87	4,3±0,82	33,3
Среднее / Average	5,77	10,20	5,0	22,5
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	0,95	-	1,4	-

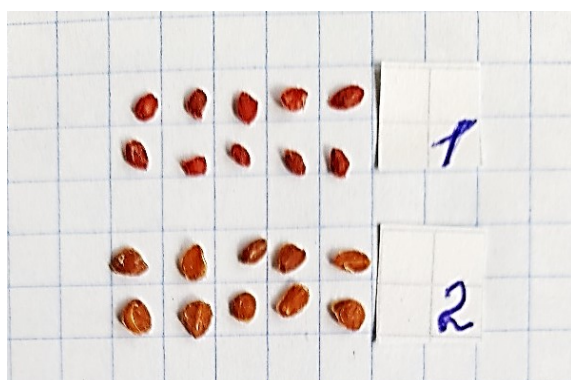


Рис. Семена сортов смородины красной:
1 – Премьера; 2 – Баяна /
Fig. Red currant seeds:
1 – 'Premiera'; 2 – 'Bayana'

Коэффициент вариации показателя «масса 1000 семян» составил в пределах 4,83 % (Нива)...19,37 % (Валентиновка). Величина семян для смородины красной является достаточно стабильным показателем и может использоваться как сортовой признак.

Крупными семенами (≥ 7 г) выделился сорт Мармеладница, характеризуется наиболее высокой долей семян от массы ягоды (8,9 %), высокий удельный вес семян от массы ягоды отмечен у сорта Баяна. Сорта с низкой долей семян предпочтительней для переработки,

т. к. снижается величина отходов от количества сырья. Высокий удельный вес семян отрицательно сказывается и на вкусовые качества ягод. До 5 % удельный вес семян от массы ягоды составил у 12 из 21 сорта, взятых в изучение. Наименьший удельный вес имели Асора (3,8 %) и Подарок победителям (3,9 %), у большей части сортов данный показатель сильно варьировал. Только сорт Валентиновка за период изучения стабильно имел низкую долю семян от массы ягоды.

Заключение. В результате исследования среди изучаемых сортов смородины красной не выявлено образцов, совмещающих мелко- и малосемянность в одном генотипе. Сорта Подарок победителям, Орловчанка, Подарок лета, Валентиновка являются источниками малосемянности с низкой долей семян от массы

ягоды. Мелкосемянностью и низкой долей семян от массы ягоды характеризуется сорт Премьера, который можно использовать в селекции как источник данных признаков. Сорта Асора и Ася со средней массой семян и их средним количеством имеют низкий удельный вес семян от массы ягоды, что является важным показателем для переработки.

Установлена положительная корреляция между количеством семян и массой ягоды. Высокий коэффициент корреляции ($r = 0,999...0,997$) у сортов Нива, Орловская звезда, Ася, Дана. Слабая степень корреляции ($r = 0,480$) между данными признаками отмечена у сорта Осиповская. Образцы с умеренной и слабой силой корреляции между количеством семян и массой ягоды представляют интерес в селекции для получения крупноплодных малосемянных сеянцев.

Список литературы

1. Сорокопудов В. Н., Мелькумова Е. А. Биологические особенности смородины и крыжовника при интродукции. Новосибирск: РАСХН, Сибирское отделение, 2003. 296 с.
2. Kendir G., Güvenç A., Acar A., Çeter T., Pinar N. M. Fruits, seeds and pollen morphology of Turkish *Ribes* L. (Grossulariaceae). Plant Systematics and Evolution. 2014;301(1):185–199. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00606-014-1064-2>
3. Атрощенко Г. П., Пупкова Н. А., Волкова К. А. Оценка сортов крыжовника для селекции и практического использования в садоводстве Ленинградской области. Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2017;(46):36–41. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29186155> EDN: YORRWF
4. Кузьмина А. А. Влияние погодных условий на элементы продуктивности крыжовника (*Grossularia reclinata* (L.) Mill). Достижения науки и техники АПК. 2018;32(12):43–46. DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-11212> EDN: YTBHLN
5. Северин В. Ф., Кандаурова В. В. Влияние способа опыления на завязываемость и массу ягод смородины черной и формирование в них семян. Плодоводство и ягодоводство России. 2009;22(2):278–285. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12972093> EDN: KXWOWN
6. Тихонова О. А. Характеристика отдельных компонентов продуктивности черной смородины в условиях северо-запада России. Современные сорта и технологии для интенсивных садов: мат-лы междунаро. научн.-практ. конф., посвящ. 275-летию А. Т. Болотова. Орел: ВНИИСПК, 2013. С. 241–244. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24502403> EDN: UQEVDP
7. Кузьмина А. А. Оценка механического состава ягод образцов смородины черной Новосибирской селекции. Вестник КрасГАУ. 2022;(9):11–16. DOI: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-9-11-16> EDN: RUEILB
8. Дадыкин В. Смородина без семян. Наука и жизнь. 2011;(7). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.nkj.ru/archive/articles/19741/?ysclid=m78zlmnuwy452302956> (дата обращения: 17.02.2025).
9. Федоровский В. Д. *Ribes spicatum* Robson – смородина колосистая (систематика, география, изменчивость, интродукция). Киев: Фитосоцицентр, 2001. 204 с.
10. Сорокопудов В. Н., Соловьева А. Е., Смирнов А. С. Красная смородина в лесостепи Приобья. Новосибирск: Агро-Сибирь, 2005. 120 с.
11. Sławinska N., Prochon K., Olas B. A Review on Berry Seeds – A Special Emphasis on Their Chemical Content and Health-Promoting Properties. Nutrients. 2023;15(6):1422. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu15061422>
12. Tarasevičienė Ž., Čechovičienė I., Jukniūtė K., Šlepėtienė A., Paulauskienė A. Qualitative properties of cookies enriched with berries pomace. Food Science and Technology (Campinas). 2021;41(2):474–481. DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.02120>
13. Голяева О. Д. Оценка сортов смородины красной по продуктивности и товарным качествам. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(30):379–387. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.379-387> EDN: QOPYJC
14. Тохтарь Л. А., Сорокопудов В. Н. Семеношение некоторых сортов *Ribes Rubrum* L. в условиях Белгородской области. Научные ведомости Белгородского Государственного Университета. Серия: Естественные науки. 2011;(15-2(104)):42–46. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21315666> EDN: RYLSNB
15. Abbott A. J., Best G. R., Webb R. A. The relation of achene number to berry weight in strawberry fruit. Journal of Horticultural Science. 1970;45(3):215–222. DOI: <https://doi.org/10.1080/00221589.1970.11514348>
16. Webb R. A. The relationship of seed number to berry weight in black currant fruit. Journal of Horticultural Science. 1971;46(2):147–152. DOI: <https://doi.org/10.1080/00221589.1971.11514393>

References

1. Sorokopudov V. N., Melkumova E. A. Biological features of currants and gooseberries during introduction. Novosibirsk: *RASKhN, Sibirskoe otd-nie*, 2003. 296 p.
2. Kendir G., Güvenç A., Acar A., Çeter T., Pınar N. M. Fruits, seeds and pollen morphology of Turkish *Ribes* L. (Grossulariaceae). *Plant Systematics and Evolution*. 2014;301(1):185–199. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00606-014-1064-2>
3. Atroshchenko G. P., Pupkova N. A., Volkova K. A. Evaluation of gooseberry cultivars for breeding and practical use in horticulture of the Leningrad region. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2017;(46):36–41. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29186155>
4. Kuzmina A. A. Influence of weather conditions on productivity elements of gooseberry (*Grossularia reclinata* (L.) Mill). *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2018;32(12):43–46. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-11212>
5. Severin V. F., Kandaurova V. V. The effect of the pollination method on the binding capacity and weight of black currant berries and the formation of seeds in them. *Plodovodstvo i yagodovodstvo Rossii* = Pomiculture and small fruits culture in Russia. 2009;22(2):278–285. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12972093>
6. Tikhonova O. A. Characteristics of individual components of productivity of black currant in the conditions of the north-west of Russia. Modern cultivars and technologies for intensive gardens: Proceedings of international scientific and practical conference dedicated to the 275th anniversary of A. T. Bolotov. Orel: *VNIISPK*, 2013. pp. 241–244. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24502403>
7. Kuz'mina A. A. Evaluating mechanical composition of blackcurrant berries samples of Novosibirsk selection. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU. 2022;(9):11–16. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-9-11-16>
8. Dadykin V. Currants without seeds. *Nauka i zhizn'*. 2011;(7). (In Russ.). Available at: <https://www.nkj.ru/archive/articles/19741/?ysclid=m78zlmuw452302956> (accessed: 17.02.2025).
9. Fedorovskiy V. D. *Ribes spicatum* Robson – spiky currant (taxonomy, geography, variability, introduction). Kiev: *Fitosotsiotsentr*, 2001. 204 p.
10. Sorokopudov V. N., Soloveva A. E., Smirnov A. S. Red currant in the forest steppe of the Ob region. Novosibirsk: *Agro-Sibir'*, 2005. 120 p.
11. Slawinska N., Prochon K., Olas B. A Review on Berry Seeds – A Special Emphasis on Their Chemical Content and Health-Promoting Properties. *Nutrients*. 2023;15(6):1422. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu15061422>
12. Tarasevičienė Ž., Čechovičienė I., Jukniūtė K., Šlepetienė A., Paulauskienė A. Qualitative properties of cookies enriched with berries pomace. *Food Science and Technology (Campinas)*. 2021;41(2):474–481. DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.02120>
13. Golyaeva O. D. Evaluation of red currant varieties according to productivity and marketability. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(3):379–387. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.379-387>
14. Tokhtar L. A., Sorokopudov V. N. Seed efficiency some grades *Ribes Rubrum* L. in the condition of the Belgorod region. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Estestvennye nauki* = Scientific Bulletins of the Belgorod State University. Natural Sciences. 2011;(15-2(104)):42–46. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21315666>
15. Abbott A. J., Best G. R., Webb R. A. The relation of achene number to berry weight in strawberry fruit. *Journal of Horticultural Science*. 1970;45(3):215–222. DOI: <https://doi.org/10.1080/00221589.1970.11514348>
16. Webb R. A. The relationship of seed number to berry weight in black currant fruit. *Journal of Horticultural Science*. 1971;46(2):147–152. DOI: <https://doi.org/10.1080/00221589.1971.11514393>

Сведения об авторах

✉ **Голяева Ольга Дмитриевна**, кандидат с.-х. наук, зав. отделом селекции и сортоизучения ягодных культур, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур», д. Жилина, Орловский район, Орловская область, Российская Федерация, 302530, e-mail: ivfo@vniispk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1106-634X>, e-mail: golyaeva@orel.vniispk.ru

Алпатова Анастасия Викторовна, младший научный сотрудник, аспирант, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур», д. Жилина, Орловский район, Орловская область, Российская Федерация, 302530, e-mail: ivfo@vniispk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8204-0566>

Information about the authors

✉ **Olga D. Golyaeva**, PhD in Agricultural Science, Head of the Department of Breeding and Variety Study of Berry Crops, Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding, Zhilina, Orel district, Orel region, Russian Federation, 302530, e-mail: ivfo@vniispk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1106-634X>, e-mail: golyaeva@orel.vniispk.ru

Anastasia V. Alpatova, junior researcher, post-graduate student, Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding, Zhilina, Orel district, Orel region, Russian Federation, 302530, e-mail: ivfo@vniispk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8204-0566>

✉ – Для контактов / Corresponding author

Особенности цветения и плодоношения новых гибридов жимолости синей в условиях Свердловской области

© 2025. А. О. Савина ✉, А. В. Шмыгов, О. А. Киселева

ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Екатеринбург, Российская Федерация

В статье приведены результаты трехлетнего изучения восьми новых гибридов жимолости синей в условиях южной тайги Среднего Урала в сравнении с контрольным сортом Полянка Котова. Цель исследований – описать фенологические особенности цветения и плодоношения, провести сравнительное изучение морфобиологических признаков новых отборных гибридов жимолости синей селекции Свердловской селекционной станции садоводства. Погодные условия в период наблюдений (2022–2024 гг.) отражали специфику континентального климата на Среднем Урале (резкие колебания суточных температур, возвратные заморозки, майские снегопады, засуха, затяжные дожди), в результате чего удалось оценить плодоношение и урожайность сортообразцов в контрастных условиях. Показано, что сумма среднесуточных положительных активных температур, необходимая для начала цветения гибридов жимолости синей находится в интервале от 237 до 281 °С, для начала массового плодоношения – от 883 до 933 °С. В условиях наблюдений гибриды 1-18-11, 1-18-23, 2-18-5, 2-18-6, 3-18-14, 3-18-26 статистически значимо превышали контрольный сорт по максимальной и средней массе плода. Дополнительно в 2024 г. проведен комплексный анализ морфобиологических признаков (степень цветения и плодоношения; осыпаемость; вкус), что позволило выделить сортообразцы с высокими дегустационными качествами 1-18-23, 2-18-5, 2-18-6. Среди них лучшее плодоношение и самую слабую осыпаемость плодов наблюдали у гибрида 1-18-23. Необходимо продолжить многолетнее наблюдение за отборными гибридами для выделения наиболее перспективного материала для дальнейшей селекции.

Ключевые слова: *Lonicera caerulea* L., сумма активных температур, фенологические оценки, урожай, Средний Урал

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (тема № FNUW-2023-003).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Савина А. О., Шмыгов А. В., Киселева О. А. Особенности цветения и плодоношения новых гибридов жимолости синей в условиях Свердловской области. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(4):788–796. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.788-796>

Поступила: 03.03.2025

Принята к публикации: 04.08.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

Flowering and fruiting characteristics of new blue honeysuckle hybrids in the conditions of the Sverdlovsk region

© 2025. Anastasia O. Savina ✉, Alexander V. Shmygov, Olga A. Kiseleva

Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

The article presents the results of a three-year study of eight new honeysuckle hybrids in the southern taiga of the Middle Urals in comparison with the control cultivar 'Polyanka Kotova'. The aim of the research is to describe the phenological features of flowering and fruiting, to conduct a comparative study of the morphobiological characteristics for new selected honeysuckle hybrids bred by the Sverdlovsk Horticultural Breeding Station. Weather conditions during the observation period (2022–2024) reflected the continental climate in the Middle Urals (extreme daily temperature fluctuations, cold snap, snowfalls in May, drought, steady rains), and it was possible to evaluate the fruiting and yield of samples in contrastive conditions. The sum of average daily positive active temperatures required for the beginning of honeysuckle hybrids flowering was in the range from 237 to 281 °C, for the beginning of heavy bearing it was in the range from 883 to 933 °C. The cultivars 1-18-11, 1-18-23, 2-18-5, 2-18-6, 3-18-14, 3-18-26 statistically significantly exceeded the control cultivar in maximum and average fruit weight under observation conditions. Additional complex analysis of morphobiological characteristics (abundance of flowering and fruiting; shedding; taste) in 2024 made it possible to select samples with high tasting qualities 1-18-23, 2-18-5, 2-18-6. Among them, the best fruiting and the weakest fruit shedding were observed for the hybrid 1-18-23. It is necessary to continue long-term observation of selected hybrids in order to obtain the most promising material for further breeding.

Keywords: *Lonicera caerulea* L., sum of active temperatures, phenological records, yield, Middle Urals

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 Federal State Budgetary Scientific Institution «Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences» (theme No. FNUW-2023-003).

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

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

For citation: Savina A. O., Shmygov A. V., Kiseleva O. A. Flowering and fruiting characteristics of new blue honeysuckle hybrids in the conditions of the Sverdlovsk region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):788–796. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.788-796>

Received: 03.03.2025

Accepted for publication: 04.08.2025

Published online: 29.08.2025

Жимолость синяя (*Lonicera caerulea* L., *Caprifoliaceae*), как ягодная культура, востребована в северном садоводстве, поскольку отличается устойчивостью, неприхотливостью и стабильным плодоношением в суровых климатических условиях. Культура ценится за богатство и разнообразие биохимического состава плодов [1, 2], нетребовательный уход и простоту размножения¹ [3]. Свердловская область является одним из центров сортоизучения и селекции жимолости [4, 5, 6]. Для каждого региона страны принципиально важно сформировать конвейер поступления свежих ягод, чтобы как можно дольше обеспечивать население полезной для употребления в свежем виде растительной продукцией. На Среднем Урале жимолость первой вступает в фазу цветения и плодоношения и становится одним из ранних источников витаминов после зимне-весеннего периода уже в начале июня [6, 7].

Разнообразие современных сортов возникло в связи с получением сложных межвидовых гибридов на основе съедобных видов жимолости (*L. caerulea* s.l.), произрастающих в регионах с умеренным континентальным климатом Северного полушария (Европейско-Сибирский мегагенцентр). В гибридизации и дальнейшей селекции используют несколько съедобных видов жимолости: камчатская (*L. kamtschatica* (Sevast.) Pojark.); Турчанинова (*L. turczaninovii* P.); алтайская (*L. altaica* Pell.); Палласа (*L. pallasii* Ledeb.); съедобная (*L. edulis* Turcz. ex Freyn) [2, 8]. Урожайность, состав плодов и прочие признаки гибридов жимолости проявляются по-разному в зависимости от региона возделывания [7, 9]. В этой связи Свердловская селекционная станция садоводства на протяжении последних 30 лет ведет испытание сортов, получение перспективных гибридов и селекцию жимолости по комплексу хозяйственно ценных признаков [4, 7]. Получен сорт раннего срока созревания Полянка Котова,

входящий в Госреестр РФ по Волго-Вятскому региону².

Цель исследований – описать фенологические особенности цветения и плодоношения, провести сравнительное изучение морфобиологических признаков новых отборных гибридов жимолости синей селекции Свердловской селекционной станции садоводства.

Научная новизна – апробация полученных в ходе селекционного отбора сортообразцов жимолости (потомков от гибридизации *L. kamtschatica*, *L. turczaninovii*, *L. edulis*) на фоне крайне нестабильных погодных условий Среднего Урала. Данный этап является неотъемлемой частью работы по созданию фонда сортообразцов, обладающих комплексом селекционно-ценных признаков и необходимым звеном формирования районированного сортамента съедобных сортов жимолости.

Материал и методы. Сады Свердловской селекционной станции садоводства находятся в южной части города Екатеринбурга (Свердловская область) на восточных склонах Уктусских гор в южно-таежной зоне, почва дерново-подзолистая среднеокультуренная.

Климат Екатеринбурга характеризуется резкой изменчивостью погодных условий, поскольку город расположен в зоне границы умеренно континентального климата с континентальным. Абсолютный минимум температуры составляет -44,6 °C (1915 г.), абсолютный максимум – +39,1 °C (2020 г.), среднегодовая температура – +1,95 °C с тенденцией на повышение [10, 11]. Согласно многолетним наблюдениям³, продолжительность залегания снежного покрова составляет 162 дня, его высота к концу зимнего периода достигает 42 см, среднегодовая сумма осадков – 471 мм. За период с 1966 по 2020 г. гидротермический коэффициент периода вегетации в Екатеринбурге изменился в сторону уменьшения с 1,58 до 1,39 [10].

¹Выращивание и переработка ягод жимолости: методические рекомендации. ГБУ Пермского края «Центр компетенций в сфере сельскохозяйственной кооперации и поддержки фермеров». Пермь, 2021. 11 с.

²Полянка Котова. Государственная Комиссия Российской Федерации по испытанию и охране селекционных достижений (ФГБУ «Госсорткомиссия»). [Электронный ресурс]. URL: <https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/polyanka-kotova-zhimolost/> (дата обращения: 17.02.2025).

³Климатические таблицы. Данные для Екатеринбурга. Погода и климат. 2004. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/28440.htm> (дата обращения: 27.02.2025).

Продолжительность вегетационного периода 160–170 дней, однако возможны существенные отклонения [10, 11]. Метеорологические наблюдения и расчеты выполнены на основе климатического архива Свердловской селекционной станции садоводства за 2022–2024 гг. При обсуждении результатов также использованы сведения из климатических таблиц открытой базы метеорологических данных⁴.

Фенологические исследования проводили в 2022–2024 гг. В качестве объектов выбраны 8 отборных гибридов из трех семей, полученных от свободного опыления сортоформ I-9-4, I-15-19 и сорта Сибирячка, в сравнении с контрольным сортом Полянка Котова (табл. 1). Все участвующие в эксперименте растения являются частью уникальной научной установки коллекции живых растений откры-

того грунта «Генофонд плодовых, ягодных и декоративных культур на Среднем Урале». Родительские формы I-9-4, I-15-19 и Сибирячка были переданы для проведения селекционной работы из ОГУП «Бакчарское» (Томская область, Западная Сибирь). В дальнейшем от высаженных на Среднем Урале растений удалось получить гибридные семьи и отобрать гибридные сеянцы, которые высажены двухлетними саженцами в гибридный сад Свердловской селекционной станции садоводства в 2018 г., когда и было начато их производственно-биологическое изучение [4]. Растения выращивали на экстенсивном агрофоне, без дополнительного полива, расстояние между экземплярами в ряду – 60 см, между рядами – 4 м. К началу нашего исследования гибриды имели возраст 5 лет.

Таблица 1 – Объекты исследования /
Table 1 – Objects of the research

Гибрид / Hybrid	Происхождение гибридов / Origin of hybrids	Происхождение гибридной семьи / Origin of the hybrid family
Первая гибридная семья / The first hybrid family		
1-18-7	I-9-4, свободное опыление / open pollination	1-19-31 (<i>L. turczaninovii</i>) × 1-39-23 (<i>L. turczaninovii</i>)
1-18-11		
1-18-23		
Вторая гибридная семья / The second hybrid family		
2-18-5	I-15-19, свободное опыление / open pollination	2-48-50 (<i>L. kamtschatica</i>) × 1-39-23 (<i>L. kamtschatica</i>)
2-18-6		
Третья гибридная семья / The third hybrid family		
3-18-14	Сибирячка, свободное опыление / ‘Sibiryachka’, open pollination	1-55-39 (<i>L. kamtschatica</i>) × <i>L. turczaninovii</i> (смесь пыльцы) / 1-55-39 (<i>L. kamtschatica</i>) × <i>L. turczaninovii</i> (pollen mixture)
3-18-18		
3-18-26		
Полянка Котова, контроль / ‘Polyanka Kotova’, control	<i>L. kamtschatica</i> , свободное опыление / <i>L. kamtschatica</i> , open pollination	-

Погодные условия в период наблюдений отражали палитру климатического многообразия континентального климата на Среднем Урале. В 2022 г. начало климатической весны (3 апреля) отмечено как позднее. Высота снежного покрова в апреле составила 53 см. Первая половина лета была дождливой, осадков выпало на 113–156 % выше нормы, за счет теплой осени (до 2 ноября) вегетационный сезон продлился 212 дней.

Самым жарким за период наблюдений был 2023 г., когда среднегодовая температура

составила 5,1 °С. В 2023 году отмечено раннее начало климатической весны (21 марта). Дневные температуры в марте достигли абсолютного максимума за всю историю наблюдений +18,1 °С. Также в мае 2023 года были достигнуты абсолютный месячный минимум по количеству осадков за всю историю наблюдений (0,5 мм при норме 47 мм) и самая высокая температура мая и июля за три года наблюдений (табл. 2), обильные дожди наблюдались только в августе (табл. 3). Вегетационный сезон длился до 22 октября (214 дней).

⁴URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/28440.htm>

Во время периода вегетации 2024 г. сложилась совершенно иная ситуация. К концу марта высота снежного покрова составила 52 см (при норме 38 см). Климатическая весна 2024 г. началась 20 марта обильным снеготаянием и сопровождалась подтоплением. Повреждающим фактором для многих культур явились мощные снегопады с ветром в мае (со 2 по 5 мая,

высота снежного покрова 21 см), затяжные ливневые дожди в течение лета, особенно в августе. Вегетационный сезон длился всего 164 дня. Несмотря на общую тенденцию к аридизации климата [10, 11], среднемесячная температура мая 2024 г. была существенно ниже по сравнению с нормой, полученной на основе многолетних наблюдений (табл. 2).

Таблица 2 – Среднемесячные температуры воздуха в г. Екатеринбурге, °C /

Table 2 – Average monthly air temperatures in Yekaterinburg, °C

Месяц / Month	2022 г.	2023 г.	2024 г.	Среднемноголетнее значение / Average long-term values
Март / March	-6,2	+0,3	-1,8	-3,6
Апрель / April	+6,0	+6,7	+8,1	+4,7
Май / May	+10,9	+16,4	+8,1	+12,2
Июнь / June	+15,7	+16,2	+19,6	+16,9
Июль / July	+20,9	+21,7	+19	+18,9
Август / August	+20,6	+17,8	+15,6	+16,2
Сентябрь / September	+10,9	+13,5	+13,0	+10,4
Октябрь / October	+5,1	+4,4	+4,3	+3,6

Сумму активных температур (САТ) рассчитывали согласно ГОСТ 17713-89⁵ как сумму средних суточных температур воздуха, превышающих биологический минимум температуры, установленный для определенного периода развития растения. Для жимолости этот показатель считается как сумма среднесуточных положительных температур выше +5 °C [12].

Для оценки особенностей увлажнения в течение вегетационного периода использовали гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК). Классификация зон увлажнения по значению ГТК: переувлажненная – более 1,6; влажная – 1,6–1,3; слабозасушливая – 1,3–1,0; засушливая – 1,0–0,7; очень засушливая – 0,7–0,4; сухая – менее 0,4⁶. Расчет гидротермического коэффициента за вегетационный сезон проведен по данным за 6 месяцев, в которые на Среднем Урале возможны жидкие атмосферные осадки.

Согласно данным, представленным в таблице 3, в период наблюдений отмечено неустойчивое увлажнение. Вегетационные сезоны 2022 и 2024 гг. можно назвать влажными, 2023 г. – слабозасушливым. Дефицит осадков наблюдали в мае 2023 и 2024 гг. Показатель гидротермического коэффициента в мае 2023 г. соответствовал сухой зоне, требующей ирригации, как и в 2021 г. [4].

Фенологические учеты проводили еженедельно в течение всего вегетационного сезона и ежедневно в период цветения и плодоношения культуры. Колебания температуры, при которых начиналось цветение, фиксировали в течение трех первых дней цветения жимолости. Изменения температуры при плодоношении фиксировали в течение недели от старта созревания отдельных плодов до начала массового плодоношения.

В 2023-2024 гг. провели учеты средней и максимальной массы плодов, данные обработаны методом дисперсионного анализа. Комплексный анализ выполнили в 2024 г. по следующим морфобиологическим признакам: визуальная балльная оценка степени цветения и плодоношения; дегустационная балльная оценка (вкус); глазомерная балльная оценка осыпаемости. Изучение перечисленных параметров выполнено в соответствии с рекомендациями⁷.

Результаты и их обсуждение. Высокую устойчивость этой ягодной культуры к действию абиотических повреждающих факторов на Среднем Урале, в Сибири и на Дальнем Востоке отмечали и ранее [4, 8, 9]. Сроки прохождения фенологических фаз зависят от накопления положительных температур [12].

⁵ГОСТ 17713-89. Сельскохозяйственная метеорология. Термины и определения: государственный стандарт Союза ССР. М.: Издательство стандартов, 1989. 15 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294835/4294835117.pdf>

⁶Журина Л. Л., Лосев А. П. Агрометеорология. М.: КолосС, 2004. 301 с.

⁷Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур. Под ред. Е. Н. Седова, Т. П. Огольцовой. Орёл: ВНИИСПК, 1999. С. 444–457.

Таблица 3 – Характеристика вегетационных сезонов по гидротермическому коэффициенту /
Table 3 – Characteristics of vegetation seasons by hydrothermal coefficient

<i>Месяц / Month</i>	<i>2022 г.</i>	<i>2023 г.</i>	<i>2024 г.</i>
Апрель / April	2,70	0,03	0,90
Май / May	4,04	0,01	0,50
Июнь / June	4,80	0,90	1,80
Июль / July	0,32	1,20	1,30
Август / August	0,70	2,10	3,20
Сентябрь / September	1,20	0,70	1,30
За сезон / Per season	1,54	1,02	1,55

Результаты выполненных нами фенологических учетов представлены в таблице 4. Сроки цветения гибридов жимолости в условиях Среднего Урала (начало мая) соответствуют литературным данным по другим регионам ее возделывания⁸ [3, 9].

Начало цветения происходило одновременно у всех изучаемых растений на фоне резких суточных колебаний температуры воздуха. В условиях Кировской области и Республики Марий Эл отмечено, что бутоны, цветки и зеленые завязи жимолости могут выдержать без повреж-

дений заморозки до -8 °С [3]. Действительно, в нашем эксперименте майские снегопады 2024 г. и понижение температуры воздуха до -3,6 °С в период начала цветения жимолости не привели к потере урожая. Однако в Республике Коми похожие метеорологические условия 2002 г. во время цветения жимолости вызвали снижение урожая у значительной части культуров [9].

Всем гибридам по обилию цветения присвоено более 4 баллов, за исключением 3-18-18, который цвел менее обильно (табл. 5).

Таблица 4 – Наступление фенологических фаз у гибридов жимолости синей в зависимости от температуры воздуха, °С /
Table 4 – Start of phenological phases in blue honeysuckle hybrids depending on air temperature, °C

<i>Год / Year</i>	<i>Дата начала фенофазы / Start date of phenological stage</i>	<i>Суточные колебания температур / Daily temperature fluctuations</i>	<i>Сумма активных температур / Sum of active temperatures</i>
Начало цветения / Start of flowering			
2022	12 мая / May 12	+3,8 ... +18,4	281
2023	01 мая / May 1	+0,1 ... +28,3	237
2024	02 мая / May 2	-3,6 ... +8,4	257
Массовое плодоношение / Mass fruiting			
2022	24 июня / June 24	+12 ... +26,8	883
2023	13 июня / June 13	+3,7 ... +23,8	933
2024	21 июня / June 21	+13,2 ... +33,6	911

Среднее значение САТ к началу цветения жимолости на Среднем Урале за 2022–2024 гг. составило 258 °С, что укладывается в интервал сумм активных температур, зафиксированных

к началу цветения культуры в Республике Коми – 215–360 °С [9], но превышает данные по Кировской области и Республике Марий Эл – 116–161 °С [3].

⁸Журина Л. Л., Лосев А. П. Указ. соч.

Массовое плодоношение в период наблюдений 2022–2024 гг. было дружным. Переход к фазе плодоношения происходил во II–III декадах июня (табл. 4). Среднее значение САТ к началу массового плодоношения жимолости на Среднем Урале составило 909 °С, при этом достигнутая САТ хорошо соотносится с данными по культуре в других регионах северного садоводства [3]. Суточные колебания температуры воздуха в период начала созревания плодов составили от 15 до 20 градусов.

Отмеченная нами стабильность цветения, ежегодное плодоношение изученных гибридов в контрастных метеоусловиях на Среднем Урале, а также выявленная ранее устойчивость к подмерзанию и повреждению верхушечной тлей [4] являются основанием для их дальнейшего использования в селекции.

Изучение плодоношения и максимальной продуктивности у жимолости проводили с учетом

года закладки насаждений. Эти показатели сильно зависят не только от погодных условий в период налива ягод, но и возраста растений. Полноценные урожаи жимолость формирует с 6–10 лет в зависимости от сорта [3]. Учет особенностей плодоношения проводили в 2023 и 2024 гг. при достижении гибридными сеянцами необходимого возраста.

При плодоношении одним из ключевых параметров для плодово-ягодных культур является масса плода. Большинство изученных гибридов в условиях наблюдений статистически значимо превышали контрольный сорт по максимальной массе плода (табл. 5), по средней массе плода ежегодно контроль превышали 7 из 8 гибридных сеянцев. По средней массе плодов выделились гибриды: 1-18-11, 1-18-23, 2-18-5, 2-18-6, 3-18-14, 3-18-26.

Таблица 5 – Особенности плодоношения гибридов жимолости синей /
Table 5 – Features of blue honeysuckle hybrids fruiting

Гибрид / Hybrid	Средняя масса плода, г / The average weight of the fruit, g		Максимальная масса плода, г / The maximum weight of the fruit, g	
	2023 г.	2024 г.	2023 г.	2024 г.
1-18-7	0,76	0,67	1,20	0,97
1-18-11	0,82	0,81	1,50	1,20
1-18-23	1,08	1,22	2,20	1,80
2-18-5	1,06	1,23	2,00	2,00
2-18-6	1,20	1,28	*	2,20
3-18-14	0,74	0,97	1,20	3,10
3-18-18	0,57	1,04	1,10	1,80
3-18-26	0,88	1,01	1,40	1,50
Полянка Котова, контроль / 'Polyanka Kotova', control	0,68	0,70	0,80	0,80
Среднее / Average	0,87	0,99	1,43	1,71
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	0,013	0,013	0,055	0,126

*Нет данных / No data

В соответствии с результатами наблюдений за два года по показателю «средняя масса плода» к растениям с крупными плодами, согласно рекомендациям⁹, можно отнести гибриды: 1-18-23, 2-18-5, 2-18-6. По максимальной массе плода выделили образцы: 3-18-14, 3-18-18, 3-18-26, 1-18-11, 1-18-23, 2-18-5. Проведенная обработка данных подтверждает статус исследованных гибридов (отборные) и

является следствием ранее проведенной работы по изучению перспективных сеянцев [4].

Параметр осыпаемости важен с точки зрения организации уборки ягод жимолости [13]. Преимущество отдается растениям с низкой осыпаемостью, по этому параметру выделены гибриды 1-18-23, 3-18-14. Вкусовые характеристики выше, чем у контрольного сорта, демонстрировали 1-18-23, 2-18-5, 2-18-6 (табл. 6).

⁹Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур. 1999. С. 444–457.

Таблица 6 – Оценка показателей цветения и плодоношения гибридов жимолости синей (2024 г.) /
Table 6 – Assessment of the indicators of flowering and fruiting of blue honeysuckle hybrids (2024)

Гибрид / Hybrid	Степень плодоношения, балл / Abundance of fruiting, points	Вкус, балл / Taste, points	Степень цветения, балл / Abundance of flowering, points	Осыпаемость / Ability to shed
1-18-7	4,0	4,3	4,5	Средняя / Average
1-18-11	5,0	4,3	5,0	Средняя / Average
1-18-23	5,0	4,4	4,5	Слабая / Weak
2-18-5	4,0	4,4	5,0	Средняя / Average
2-18-6	4,5	4,4	4,0	Средняя / Average
3-18-14	4,0	4,2	5,0	Слабая / Weak
3-18-18	4,8	4,3	3,5	Средняя / Average
3-18-26	5,0	4,2	5,0	Средняя / Average
Полянка Котова, контроль / 'Polyanka Kotova', control	4,0	4,3	4,0	Слабая / Average

Самое обильное цветение и плодоношение имели гибриды: 1-18-11, 3-18-26, 1-18-23. Лидером по сумме изученных хозяйственно ценных признаков, по данным 2024 г., стал отборный гибрид 1-18-23.

Закключение. Несмотря на погодные аномалии, контрольный сорт и отборные гибриды жимолости синей плодоносили ежегодно в период 2022–2024 гг. Изученные сортообразцы жимолости приспособлены к продолжительности вегетационного периода Среднего Урала и нетребовательны к накоплению тепла для наступления основных фаз вегетации.

Проявившиеся в контрастных условиях 2022–2024 гг. адаптационные возможности гибридов указывают на их устойчивость в резко континентальном климате. Проведенный комплексный анализ морфобиологических признаков, а также двухлетнее изучение гибридов по массе плодов позволили выделить перспективный сортообразец 1-18-23. Однако необходимо продолжить многолетнее наблюдение за отборными гибридами, чтобы получить наиболее перспективный материал для дальнейшей селекции и получения сорта.

Список литературы

1. Česonienė L., Labokas J., Jasutienė I., Šarkinas A., Kaškonienė V., Kaškonas P. et al. Bioactive compounds, antioxidant, and antibacterial properties of *Lonicera caerulea* berries: evaluation of 11 cultivars. *Plants* (Basel). 2021;10(4):624. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10040624>
2. Абдуллина Р. Г., Пупыкина К. А., Баламетова Р. Г. Биохимический состав плодов *Lonicera caerulea* L. и ее подвидов при интродукции в условиях Башкирского Предуралья. *Химия растительного сырья*. 2022;(3):195–202. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220310885> EDN: NGFNVB
3. Софронов А. П., Фирсова С. В., Головунин В. П. Жимолость синяя (*Lonicera caerulea* L.): технология и селекция. Киров: ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока, 2021. 64 с.
Режим доступа: <https://fanc-sv.ru/uploads/docs/2021/Жимолость%20синяя-2021.pdf>
4. Евтушенко Н. С., Макаренко С. А., Шмыгов А. В. Селекционная оценка гибридных семей жимолости в условиях Среднего Урала. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2022;213(7):24–28. DOI: <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-213-7-24-28> EDN: SEAWYX
5. Уфимцева Л. В., Глаз Н. В. Влияние метеорологических условий на биохимический состав и вкус плодов жимолости. *Плодоводство и ягодоводство России*. 2018;(55):151–159. DOI: <https://doi.org/10.31676/2073-4948-2018-55-151-159> EDN: YWOSAX
6. Савина А. О., Киселева О. А., Шмыгов А. В. Сортовые различия ягод жимолости по комплексу химических показателей. *Индустрия питания*. 2024;9(3):90–97. DOI: <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2024-9-3-9> EDN: TMSPBZ

7. Завалишина О. М., Лёзин М. С., Севрюкова В. А. Оценка сортов жимолости по ряду показателей в условиях Среднего Урала. Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017;7(153):39–44. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29368545> EDN: YSRLYF
8. Петруша Е. Н. Сроки прохождения фенологических фаз развития жимолости камчатской. Вестник Российской сельскохозяйственной науки. 2022;(4):33–35. DOI: <https://doi.org/10.31857/2500-2082/2022/4/33-35> EDN: BINUOX
9. Рябинина М. Л. Биологические особенности жимолости в условиях среднетаежной подзоны Республики Коми. Вестник Поморского университета. Серия: естественные и точные науки. 2008;(4):30–34. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11702347> EDN: JWCDQR
10. Васильев А. А., Нохрин Д. Ю., Гасымов Ф. М., Глаз Н. В. Анализ агроклиматических условий Уральского региона за период с 1966-го по 2020 годы и перспективный прогноз изменения среднегодовой температуры до 2050 года. АПК России. 2022;29(2):139–147. DOI: <https://doi.org/10.55934/2587-8824-2022-29-2-139-147> EDN: ZNTCDL
11. Кукарских В. В., Дэви Н. М., Бубнов М. О., Комарова А. В., Агафонов Л. И. Городской остров тепла г. Екатеринбурга: есть ли влияние на радиальный прирост сосны обыкновенной? Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2022;15(2):264–278. DOI: <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0386> EDN: KRASMY
12. Зарипова В. М., Давлетов А. М., Нигматзянов Р. А., Сорокопудов В. Н. Особенности фенологического развития сортов жимолости в условиях Предуралья Башкортостана. Вестник КрасГАУ. 2022;(9(186)):74–79. DOI: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-9-74-79> EDN: DROLUY
13. Брыксин Д. М. Оценка сортов жимолости селекции ФГБНУ «ФНЦ им. И. В. Мичурина» по усилию отрыва и прочности плодов. Плодоводство и ягодоводство России. 2017;(50):76–79. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30730787> EDN: ZWMNLL

References

1. Česonienė L., Labokas J., Jasutienė I., Šarkinas A., Kaškonienė V., Kaškonas P. et al. Bioactive compounds, antioxidant, and antibacterial properties of *Lonicera caerulea* berries: evaluation of 11 cultivars. Plants (Basel). 2021;10(4):624. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10040624>
2. Abdullina R. G., Pupykina K. A., Balametova R. G. Study of the flavonoid composition of *Juglans nigra* L. bark. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* = Chemistry of plant raw material. 2022;(3):195–202. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220310885>
3. Sofronov A. P., Firsova S. V., Golovunin V. P. Blue honeysuckle (*Lonicera caerulea* L.): technology and breeding. Kirov: FGBNU FANTs Severo-Vostoka, 2021. 64 p. URL: <https://fanc-sv.ru/uploads/docs/2021/Жимолость%20осинья-2021.pdf>
4. Evtushenko N. S., Makarenko S. A., Shmygov A. V. Breeding evaluation of hybrid honeysuckle families in the Middle Urals. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2022;213(7):24–28. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-213-7-24-28>
5. Ufimtseva L. V., Glaz N. V. The influence of meteorological conditions on the biochemical composition and taste of the fruit. *Plodovodstvo i yagodovodstvo Rossii* = Pomiculture and small fruits culture in Russia. 2018;(55):151–159. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31676/2073-4948-2018-55-151-159>
6. Savina A. O., Kiseleva O. A., Shmygov A. V. Varietal differences of frozen honeysuckle berries by the chemical parameters set. *Industriya pitaniya* = Food Industry. 2024;9(3):90–97. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2024-9-3-9>
7. Zavalishina O. M., Lezin M. S., Sevryukova V. A. Evaluation of honeysuckle varieties regarding complex of indices under the conditions of the Middle Urals. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2017;7(153):39–44. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29368545>
8. Petrusheva E. N. The timing of the passage of the phenological phases of the development of kamchatka honeysuckle. *Vestnik Rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki* = Vestnik of the Russian agricultural science. 2022;(4):33–35. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/2500-2082/2022/4/33-35>
9. Ryabinina M. L. Biological peculiarities of blue honeysuckle in conditions of the middle taiga subzone of the Komi Republic. *Vestnik Pomorskogo universiteta. Seriya: estestvennye i tochnye nauki* = Arctic Environmental Research. 2008;(4):30–34. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11702347>
10. Vasiliev A. A., Nokhrin D. Yu., Gasymov F. M., Glaz N. V. Analysis of the agro-climatic conditions of the Ural region for the 1966–2020 period and a long-term forecast of the average annual temperature changes until 2050. *APK Rossii* = Agro-Industrial Complex of Russia. 2022;29(2):139–147. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.55934/2587-8824-2022-29-2-139-147>

11. Kukarskikh V. V., Devi N. M., Bubnov M. O., Komarova A. V., Agafonov L. I. Urban heat island of Ekaterinburg: does it affect radial growth of the scots pine? *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya* = Journal of Siberian Federal University. Biology. 2022;15(2):264–278. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0386>

12. Zaripova V. M., Davletov A. M., Nigmatzyanov R. A., Sorokopudov V. N. The honeysuckle varieties phenological development features under the Bashkortostan Cis-Urals conditions. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU. 2022;(9(186)):74–79. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2022-9-74-79>

13. Bryksin D. M. Evaluation of varieties of honeysuckle of I. V. Michurin Federal Research Center breeding on detachment and strength of fruits. *Plodovodstvo i yagodovodstvo Rossii* = Pomiculture and small fruits culture in Russia. 2017;(50):76–79. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30730787>

Сведения об авторах

✉ **Савина Анастасия Олеговна**, младший научный сотрудник, Свердловская селекционная станция садоводства – структурное подразделение ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», ул. Белинского, 112а, Екатеринбург, Российская Федерация, 620142, e-mail: sadovodstvo@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6529-5636>, e-mail: anastasisavin4@yandex.ru

Шмыгов Александр Васильевич, младший научный сотрудник, Свердловская селекционная станция садоводства – структурное подразделение ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», ул. Белинского, 112а, Екатеринбург, Российская Федерация, 620142, e-mail: sadovodstvo@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4889-3393>

Киселева Ольга Анатольевна, старший научный сотрудник, Свердловская селекционная станция садоводства – структурное подразделение ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», ул. Белинского, 112а, Екатеринбург, Российская Федерация, 620142, e-mail: sadovodstvo@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8619-6416>

Information about the authors

✉ **Anastasia O. Savina**, junior researcher, Sverdlovsk Horticultural Breeding Station – structural subdivision of Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 112 a, Belinsky Street, Yekaterinburg, Russian Federation, 620142, e-mail: sadovodstvo@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6529-5636>, e-mail: anastasisavin4@yandex.ru

Alexander V. Shmygov, junior researcher, Sverdlovsk Horticultural Breeding Station – structural subdivision of Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 112 a, Belinsky Street, Yekaterinburg, Russian Federation, 620142, e-mail: sadovodstvo@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4889-3393>

Olga A. Kiseleva, senior researcher, Sverdlovsk Horticultural Breeding Station – structural subdivision of Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 112 a, Belinsky Street, Yekaterinburg, Russian Federation, 620142, e-mail: sadovodstvo@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8619-6416>

✉ – Для контактов / Corresponding author

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.797-806>

УДК 632.938.1:635.21:632.7



Результаты изучения сортов картофеля на устойчивость к колорадскому жуку двумя полевыми методами

© 2025. С. Р. Фасулати✉, О. В. Иванова

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Сравнительную устойчивость 23 сортов картофеля к колорадскому жуку *Leptinotarsa decemlineata* Say (Coleoptera, Chrysomelidae) изучали в 2019–2024 гг. в агроклиматических условиях центра Ленинградской области, где данный вредитель постоянно обитает с 1998 г. Исследования проводили в полевых опытах по двум методикам: 1) с применением искусственного заселения изучаемых сортообразцов картофеля личинками I возраста; 2) на естественном фоне заселения насекомым опытного участка. В первом случае определяли продолжительность развития личинок и всего преимагинального развития особей, процент выживших личинок IV возраста и процент окрылившихся имаго по отношению к количеству подсаженных личинок I возраста. Во втором случае устойчивые к вредителю сорта картофеля отбирали по критериям уровня численности вредителя во всех фазах и степени (баллу) поврежденности ботвы. По данным 2019–2024 гг., наиболее устойчивы к вредителю сорта Наяда, Сиреневый туман (Россия), Ред Фэнтази, Фиделия (Германия). В опытах с искусственным заселением растений выживаемость личинок на этих сортах обычно составляла 30–55 %, а окрыляемость имаго – 5–38 %. Такие же результаты получены на сортах Гулливер, Пионер, Конкурент (Россия), Гренадер (Германия), Беркут (Казахстан), которые в 2024 г. изучали впервые. При развитии на них выживало 19–54 % личинок и окрылялось 1,3–15,1 % имаго, тогда как на неустойчивых (наиболее благоприятных для вредителя) сортах Невский, Форвард, Сарма, Альфа, Садон, Ариэль (Россия) – 65–96 % личинок и 34–69 % имаго. На естественном фоне заселения растений вредителем в 2024 г. на устойчивых сортах в расчете на 100 кустов отмечали по 10–30 перезимовавших жуков и 250–440 личинок, на неустойчивых – 35–87 жуков и 500–1600 личинок. Различия устойчивых и неустойчивых сортов по названным критериям значимы при $p < 0,01$. Выявленные устойчивые сорта могут служить основой систем интегрированной защиты картофеля, отвечающих требованиям экологической безопасности. Использование двух полевых методов позволяет более объективно выделять устойчивые к колорадскому жуку сортообразцы и характеризовать различные стороны воздействия кормового растения на фитофага.

Ключевые слова: *Solanum tuberosum* L., фитофаг, вредитель, имаго, личинка, численность, выживаемость, поврежденность растений

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания (тема № FGEU-2023-0006).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Фасулати С. Р., Иванова О. В. Результаты изучения сортов картофеля на устойчивость к колорадскому жуку двумя полевыми методами. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(4):797–806.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.797-806>

Поступила: 19.03.2025

Принята к публикации: 18.07.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

The results of the potato cultivars study for resistance to the Colorado potato beetle using two field methods

© 2025. Sergey R. Fasulati ✉, Olga V. Ivanova

All-Russian Institute of Plant Protection, Saint-Petersburg, Russian Federation

The comparative resistance of 23 potato cultivars to the Colorado potato beetle *Leptinotarsa decemlineata* Say (Coleoptera, Chrysomelidae) was studied in 2019–2024 in the agro-climatic conditions of the centre of Leningrad Region, where this pest has been steadily found since 1998. The research was carried out in field experiments by two methods: 1) using the artificial colonization of the studied potato samples by larvae in the I age; 2) on the natural background of pest colonization of the experimental site. In the first case, the longevity of larval development and the whole preimaginal development of individuals and also the percentage of survived larvae in the IV age and the percentage of winged imagoes in relation to the number of colonized larvae in I age were determined. In the second case, the pest-resistant potato cultivars were screened by criteria of the level of pest abundance in all phases and the degree (point) of damage to the tops. According to the data of 2019–2024, the most pest-resistant potato cultivars were 'Nayada', 'Sirenevyy Tuman' (Russia), 'Red Fantasy', 'Fidelia' (Germany). In experiments with artificial colonization of plants, the larval survival on these cultivars was usually observed at the level of 39–55 %, and the winged imagoes – at the level of 5–38 %. The same results were received on the cultivars 'Gulliver',

‘Pioneer’, ‘Konkurent’ (Russia), ‘Grenader’ (Germany) and ‘Berkut’ (Kazakhstan), which were studied in 2024 for the first time. During the development, 19–54 % of larvae survived and 1.3–15.1 % of imagoes were winged, while 65–96 % of larvae and 34–69 % of imagoes survived on the non-resistant (most favorable for the pests) cultivars ‘Nevsky’, ‘Forward’, ‘Sarma’, ‘Alfa’, ‘Sadon’ and ‘Ariel’ (Russia). In 2024 against the natural background of insect colonization of plants on resistant cultivars 10–30 overwintered beetles and 250–440 larvae were found per 100 bushes, while on non-resistant cultivars, 35–87 beetles and 500–1600 larvae were found. These differences between resistant and non-resistant cultivars are significant at $p < 0.01$. The identified resistant cultivars may be used as the basis of integrated potato protection systems that meet environmental safety requirements. The use of two field methods allows for a more objective screening of samples resistant to the Colorado potato beetle and for the characterization of the various effects of the fodder plant on the phytophage.

Keywords: *Solanum tuberosum* L., phytophag, pest, imago, larva, number, survival, plant damage

Acknowledgments: the research was carried within the state assignment of the All-Russian Research Institute for Plant Protection (theme No. FGEU-2023-0006).

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: Fasulati S. R., Ivanova O. V. The results of potato cultivars study for resistance to the Colorado potato beetle using the two field methods. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):797–806. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.797-806>

Received: 19.03.2025

Accepted for publication: 18.07.2025

Published online: 29.08.2025

Защита посадок картофеля от основного вредителя этой культуры – колорадского жука *Leptinotarsa decemlineata* Say (Coleoptera, Chrysomelidae) ныне является серьезной проблемой как в южных, так и в большинстве северных, и восточных зон картофелеводства, где он расселился и успешно акклиматизировался в последние 25–30 лет. В настоящее время в России его ареал охватывает значительную часть Северо-Западного региона РФ, многие районы Сибири и юг Дальнего Востока [1, 2, 3]. Присущие колорадскому жуку экологическая пластичность, склонность к территориальной экспансии, постоянно высокий уровень численности и вредоносности в большинстве зон вселения дали основания отнести его к категории вредителей-супердоминантов [1]. Повсеместная потребность в защитных мероприятиях против колорадского жука повышает актуальность применения научно обоснованных систем интегрированной защиты растений (ИЗР), которые базируются на возделывании устойчивых к вредным организмам сортов [4, 5] и отвечают требованиям экологической безопасности картофелеводства [1, 6, 7]. Представляется, что наибольшая эффективность систем ИЗР может быть достигнута в Северо-Западном, Северном и других регионах России, где климатические условия менее благоприятны для массового размножения колорадского жука, чем в более южных районах, и возделывание устойчивых к нему сортов картофеля нередко приводит к сдерживанию его численности ниже установленных экономических порогов вредоносности (ЭПВ)¹ [7, 8, 9].

Устойчивость разных видов и форм картофеля к колорадскому жуку, как и других культур к насекомым-фитофагам, имеет полигенную природу и определяется разнообразными признаками и свойствами растений, которые выступают в качестве механизмов устойчивости. У сортов и гибридов картофеля это, как правило, различные физиолого-биохимические особенности, иногда в сочетании с некоторыми анатомо-морфологическими признаками [5, 10, 11]. Весьма часто вегетативные органы устойчивых форм содержат, помимо типичного для картофеля соланина, также другие вторичные физиологически активные вещества: гликоалкалоиды α -томатин, лептин, солакаулин и другие, а также жирные кислоты [12, 13], трудногидролизуемые молекулярные структуры основных биополимеров пищи и белки-ингибиторы пищеварительных ферментов насекомого [4, 5, 14]. Эти вещества обладают выраженными токсическими, репеллентными, детеррентными, антифидантными и другими свойствами (например, тормозящими рост и нарушающими процессы развития и метаморфоза насекомых), что и определяет, главным образом, сильное антибиотическое воздействие содержащих их растений на фитофагов, вплоть до полной несъедобности растений [4, 15]. Кроме того, некоторые из подобных соединений могут вызывать развитие некрозов тканей листа под кладками яиц жуков в результате реакций взаимодействия физиологически активных веществ, выделяемых устойчивыми формами растений, с веществами секрета яйцеводов самок жука, которым покрыты

¹Алехин В. Т. Экономические пороги вредоносности вредителей, болезней и сорных растений в посевах сельскохозяйственных культур: справочник. М.: МСХ РФ, 2016. 73 с.

откладываемые яйца. Это приводит к отторжению и опадению с листьев значительной части яиц [14, 16]. Наиболее высоким уровнем устойчивости к вредителю обладают те сорта картофеля, которые сочетают в одном генотипе наибольшее число названных признаков.

В Государственном реестре селекционных достижений, допущенных к использованию в РФ², зарегистрировано более 500 сортов картофеля, в том числе около 200 высокопродуктивных, рекомендованных для Северо-Западного и Северного регионов страны. Однако большинство новых сортов остаются неизученными по характеристикам устойчивости к колорадскому жуку и другим массовым вредоносным объектам, что не способствует экологической оптимизации защитных мероприятий.

Цель исследований – сравнительная оценка устойчивости сортов картофеля к колорадскому жуку полевыми методами на фоне искусственного и естественного заселения растений вредителем в условиях Северо-Запада России.

Научная новизна – проведена оценка устойчивости к колорадскому жуку ранее не изучавшихся 12 сортов картофеля по нескольким критериям воздействия кормового растения на фитофага, которые свидетельствуют о различных механизмах его самозащиты от вредителя. Выделены 5 новых устойчивых сортов и подтверждена устойчивость к фитофагу 4 сортов.

Материал и методы. Исследования проводили в 2019–2024 гг. на опытном поле ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений» (далее – ВИЗР) в г. Пушкине – пригороде Санкт-Петербурга, а в 2024 г. – в Гатчинском районе Ленинградской области на поле ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (далее – АФИ). Основное внимание уделяли изучению биологических показателей развития и пищевых адаптаций колорадского жука в северной зоне акклиматизации фитофага с одновременным выделением слабо повреждаемых им сортов растений. В статье представлены исследования по 23 сортам картофеля российской и зарубежной селекции (Германия, Казахстан).

В настоящее время практически отсутствуют экспресс-методы индикации устой-

чивых к членистоногим вредителям сортов растений по молекулярным белковым и ДНК-маркерам. Доступным способом скрининга устойчивых к колорадскому жуку форм пасленовых культур остается их отбор по экологическим и биохимическим критериям³ [18, 19]. В частности, полевой скрининг сортов, согласно методикам ВИЗР, может вестись двумя основными методами.

1. *Применение искусственного заселения изучаемых сортообразцов личинками I возраста.* Используется при отсутствии естественного очага вредителя в месте проведения опытов и применяется нами с 2015 г. на опытном поле ВИЗР. Образцы картофеля высаживали деланками по 16–24 куста единой 4-рядной полосой. Изучаемый набор из 15–25 сортов ежегодно частично обновляли, однако сохраняли в нем в качестве контрольных образцов несколько сортов, которые стабильно проявляли как устойчивость к фитофагу (Наяда, Сиреневый Туман, Ред Фантази, Фиделия), так и были наиболее благоприятны для его развития (Невский, Дальневосточный) [17]. В 2024 г. изучали 23 сорта картофеля, в том числе 12 из них – впервые. На каждый образец картофеля подсаживали по 75–90 личинок, которых выводили в лаборатории из кладок яиц, собранных в естественных очагах вредителя в Ленинградской области. Критериями отбора устойчивых сортообразцов в таких опытах являются следующие биоэкологические показатели развития колорадского жука, определяемые на каждом сортообразце путем периодических осмотров опытного участка:

- минимальная продолжительность развития личинок в днях от даты выхода из яиц до даты появления первых предкуколок, т. е. до даты начала ухода старших личинок IV возраста в почву на окукливание;

- минимальная продолжительность всего преимагинального развития особей в днях, т. е. от даты выхода личинок из яиц до даты появления первых окрылившихся жуков нового поколения;

- процент выживших личинок IV возраста и процент окрылившихся жуков от количества подсаженных личинок I возраста.

²Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию в Российской Федерации. Сорта растений. М.: МСХ РФ, 2024. Т. 1. 645 с. (издание официальное).

³Методические рекомендации по оценке устойчивости картофеля и кукурузы к главнейшим вредителям. Л.: ВИЗР, 1980. 138 с.

2. *Скрининг устойчивых к вредителю сортообразцов на естественном фоне заселения растений вредителем.* Применение данного метода возможно при размещении опытного участка в очаге постоянного обитания фитофага. Критериями отбора устойчивых форм растений в этих условиях являются следующие показатели:

- численность перезимовавших имаго, кладок яиц, личинок III-IV возрастов на деланке сорта с последующим пересчетом на 100 растений;

- степень поврежденности ботвы разных сортов по 6-балльной шкале ВИЗР на дату одновременного обследования образцов [18].

В 2024 г. этот способ применили на опытных полях АФИ (Гатчинский район), где в предыдущие годы сформировался обширный очаг вредителя с высоким уровнем численности, значительно превышающим ЭПВ [9]. Здесь были высажены те же 23 сорта картофеля, что и на поле ВИЗР, в виде коллекционной посадки с однорядковыми деланками каждого сорта по 8 кустов. Таким образом, в 2024 г. впервые представилась и была реализована возможность параллельного изучения набора сортов картофеля по параметрам устойчивости к вредителю двумя полевыми методами.

Статистическую обработку данных проводили независимо для двух полевых вариантов опыта. В обоих из них сорта ранжировали по каждому из 4 критериев в порядке возрастания либо убывания их абсолютных значений и затем сравнивали методом «суммы рангов», ранее разработанным в ВИЗР для выделения сортообразцов растений, устойчивых к членистоногим вредителям [5, 18]. Путем вычисления суммы рангов для каждого из сортов оценочной группы определяли средний ранг по всем примененным критериям оценки – так называемый «индекс устойчивости I». Дальнейший порядок вычислений позволяет охарактеризовать сортообразцы оценочной группы по 3 градациям общего уровня устойчивости. Проводили также сравнение значений каждого оценочного показателя у всех изучавшихся сортов с определением области варьирования его среднего значения в пределах $\pm 2/3\sigma$. Это позволяет выявить сорта, различающиеся по данному критерию на высоком уровне значимости ($p < 0,01$), и дать примерную характеристику механизмов их устойчивости к вредителю.

Результаты и их обсуждение. Результаты опыта с искусственным заселением

растений личинками вредителя приведены в таблице 1. Проведение данного опыта возможно на полях, где отсутствуют естественные очаги фитофага. В названных опытах изучается только характер влияния качества корма на показатели преимагинального развития фитофага в условиях принудительного питания личинок листьями тех образцов растений, на которые они подсажены. Таким образом, данный метод позволяет выявить сорта (генотипы) растений, оказывающие депрессирующее воздействие на развивающихся личинок вредителя, т. е. являющиеся для них неблагоприятным кормом, вызывающим замедление развития, повышенную смертность и т. п.

Названными свойствами обладают все 4 контрольных сорта, устойчивость которых к вредителю выявлена ранее [17] и стабильно проявлялась в опытах разных лет, включая 2024 г.: Наяда, Сиреневый Туман, Ред Фэнтази и Фиделия (табл. 1). Из впервые изученных сортов более продолжительное преимагинальное развитие (30–34 дня) и низкая выживаемость особей (1,3–15,1 % окрылившихся имаго) наблюдали у сортов Конкурент, Командор, Беркут, Гренадер, Гулливер и Пионер. По сравнению с ними при развитии личинок на неустойчивых сортах Невский, Дальневосточный, Рубин (контрольные), Форвард, Альфа, Сарма и Ариэль (новые) эти показатели в тех же условиях составили соответственно 26–28 дней и 34,6–69,4 %. Приведенные значения показателей развития особей фитофага на устойчивых и неустойчивых сортах различаются при $p < 0,01$.

Результаты опыта в естественном очаге колорадского жука приведены в таблице 2. В этих условиях прослеживается весь период развития фитофага на образцах растений, заселяемых им при свободном выборе корма, и мест откладки яиц с момента появления всходов до окончания вегетации культуры. Данный метод позволяет изучать пищевую избирательность насекомого, т. е. сравнительное предпочтение им растений разных генотипов по показателям численности перезимовавших имаго и кладок яиц в расчете на 100 растений. Эти показатели определяли путем 4 еженедельных учетов, которые служили повторностями опыта.

Как видно из данных таблицы 2, наименее предпочитаемы вредителем сорта Наяда, Сиреневый Туман, Ред Фэнтази. Значения их оценочных критериев соответственно 9,5; 15,5; 21,8 жука и 15,8; 28,0; 18,7 кладки на 100 кустов.

Таблица 1 – Сравнительная оценка устойчивости сортов картофеля к колорадскому жуку при искусственном заселении растений его личинками (опытное поле ВИЗР, 2024 г.) /
Table 1 – Comparative evaluation of the resistance of potato cultivars to the Colorado potato beetle during the artificial colonization of plants by its larvae (Experimental field of VISR, 2024)

Сорта картофеля / Potato cultivars	Минимальная продолжительность развития / Least longevity of development				Выжило личинок / Survived larvae		Окрылось жуков / Winged imagoes		Индекс I (средний ранг) и устойчивости сорта / The index I (average range) and resistance of the cultivar	
	личинки / larvae		личинки и куколки / larvae + pupae		%	ранг / range	%	ранг / range		
	дни / days	ранг / range	дни / days	ранг / range						
Конкурент / 'Konkurent'	13	12,5	31	5,0	54,7	14,0	2,7	3,0	8,63	Res.*
Амур / 'Amur'	13	12,5	27	20,0	40,9	7,0	25,0	11,0	12,62	-
Командор / 'Komandor'	13	12,5	31	5,0	63,6	18,0	2,3	2,0	9,38	-
Гулливёр / 'Gulliver'	14	4,0	28	14,5	45,3	10,0	16,0	8,0	9,12	-
Невский / 'Nevsky'	12	19,5	29	9,5	82,2	22,0	60,3	22,0	18,25	Susc.**
Наяда / 'Nayada'	14	4,0	32	2,5	39,1	6,0	11,5	6,0	4,63	Res.
Беркут / 'Berkut'	13	12,5	30	7,0	36,0	5,0	15,1	7,0	7,87	Res.
Сиреневый Туман / 'Sirenevyy Tuman'	14	4,0	32	2,5	45,8	11,0	38,6	15,0	8,13	Res.
Форвард / 'Forvard'	12	19,5	28	14,5	66,3	19,0	48,8	20,5	18,37	Susc.
Гренадер / 'Grenader'	13	12,5	31	5,0	33,3	4,0	1,3	1,0	5,63	Res.
Пионер / 'Pioner'	13	12,5	34	1,0	18,8	1,0	7,1	5,0	4,87	Res.
Балтик Роуз / 'Baltic Rose'	13	12,5	28	14,5	55,1	15,0	48,3	19,0	15,25	Susc.
Флагман / 'Flagman'	13	12,5	28	14,5	31,4	2,0	23,3	10,0	9,75	-
Рубин / 'Rubin'	11	22,5	28	14,5	76,5	21,0	69,4	23,0	20,25	Susc.
Навигатор / 'Navigator'	13	12,5	27	20,0	31,8	3,0	17,0	9,0	11,13	-
Моряк / 'Moryak'	14	4,0	28	14,5	53,1	13,0	43,2	17,0	12,12	-
Ред Фэнтези / 'Red Fantasy'	14	4,0	29	9,5	44,0	8,5	32,1	12,0	8,50	Res.
Дальневосточный / 'Dalnevostochny'	12	19,5	29	9,5	72,7	20,0	39,0	16,0	16,25	Susc.
Фиделия / 'Fidelia'	14	4,0	29	9,5	56,3	16,0	5,7	4,0	8,38	Res.
Сарма / 'Sarma'	12	19,5	27	20,0	46,2	12,0	34,6	13,0	16,12	Susc.
Альфа / 'Alpha'	11	22,5	26	23,0	57,1	17,0	48,8	20,5	20,75	Susc.
Садон / 'Sadon'	13	12,5	27	20,0	44,0	8,5	35,7	14,0	13,75	-
Ариэль / 'Ariel'	14	4,0	27	20,0	96,1	23,0	47,4	18,0	16,25	Susc.
Среднее / Average, ±2/3σ	13,0±0,61	-	29,0±1,33	-	51,8±11,93	-	29,3±12,93	-	-	-
НСР ₀₅ / LSD ₀₅ , p < 0,01	1,22	-	2,66	-	23,86	-	25,96	-	-	-
Границы средней области / Limits of average zone	12,3–13,61	-	27,6–30,33	-	39,8–63,73	-	16,37–42,23	-	-	-
Средневзвешенный индекс устойчивости для 23 сортов: I±2/3σ = 12,00±3,19 / The average resistant index for 23 cultivars: I±2/3σ = 12,00±3,19 *Устойчивые сорта / Resistant cultivars (Res.): I<8,81; **Неустойчивые сорта / Susceptible cultivars (Susc.): I>15,21										

Таблица 2 – Сравнительная оценка устойчивости сортов картофеля к колорадскому жуку на естественном фоне заселения растений вредителем (Опытное поле АФИ, 2024 г.) /
Table 2 – Comparative evaluation of the resistance of potato cultivars to the Colorado potato beetle on the natural background of colonization of plants by the pest (Experimental field of AFI, 2024)

Сорт картофеля / Potato cultivar	Расчётное количество единиц на 100 растений / Accounted number of units per 100 plants						Средний балл поврежденности растений / Average damage point of plants 26.07.2024			Индекс I (средний ранг) и устойчивость сорта / The index I (average range) and resistance of the culti- var
	жуков / beetles		кладок яиц / egg groups		личинок / larvae 15.07.2024		балл / points		rang / range	
	n	rang / range	n	rang / range	n	rang / range				
Конкурент / 'Konkurent'	50,0	18,0	25,0	5,0	380	6,0	3,5	15,0	11,00	-
Амур / 'Amur'	35,7	12,0	31,3	8,5	310	4,0	3,0	11,0	8,88	Res.*
Командор / 'Komandor'	31,3	9,0	25,0	5,0	500	11,0	3,9	19,5	11,12	-
Гулливер / 'Gulliver'	46,8	16,5	15,8	1,5	250	1,5	3,4	13,5	8,25	Res.
Невский / 'Nevsky'	15,5	3,5	56,3	16,5	940	19,0	3,3	12,0	12,75	-
Наяда / 'Nayada'	9,5	1,5	15,8	1,5	310	4,0	1,9	1,0	2,00	Res.
Беркут / 'Berkut'	31,3	9,0	50,0	13,0	1130	20,0	2,9	10	13,00	-
Сиреневый Туман / 'Sirenevu Tuman'	15,5	3,5	28,0	7,0	250	1,5	2,1	2,0	3,50	Res.
Форвард / 'Forvard'	25,0	7,0	65,5	19,0	1380	22,0	3,6	16,0	16,00	Susc.**
Гренадер / 'Grenader'	34,2	11,0	40,8	11,5	810	16,0	4,3	21,0	14,87	-
Пионер / 'Pioner'	37,5	13,5	68,8	20,5	310	4,0	2,8	8,0	11,50	-
Балтик Роуз / 'Baltic Rose'	21,8	5,5	53,0	14,5	440	8,0	2,5	5,0	8,25	Res.
Флагман / 'Flagman'	56,3	20,5	40,8	11,5	1630	23,0	3,8	17,5	18,13	Susc.
Рубин / 'Rubin'	87,5	23,0	134,5	23,0	880	18,0	2,5	5,0	17,25	Susc.
Навигатор / 'Navigator'	56,3	20,5	59,3	18,0	630	13,0	3,9	19,5	17,75	Susc.
Моряк / 'Moryak'	37,5	13,5	25,0	5,0	500	11,0	3,8	17,5	11,75	-
Ред Фэнтези / 'Red Fantasy'	21,8	5,5	18,7	3,0	440	8,0	2,8	8,0	6,12	Res.
Дальневосточный / 'Dalnevostochny'	43,7	15,0	31,3	8,5	810	16,0	2,8	8,0	11,88	-
Фиделия / 'Fidelia'	9,5	1,5	53,0	14,5	440	8,0	2,5	5,0	7,25	Res.
Сарма / 'Sarma'	46,8	16,5	75,0	22,0	810	16,0	2,4	3,0	14,37	-
Альфа / 'Alpha'	31,3	9,0	37,5	10,0	500	11,0	4,5	23,0	13,25	-
Садон / 'Sadon'	53,0	19,0	68,8	20,5	750	14,0	3,4	13,5	16,75	Susc.
Ариэль / 'Ariel'	75,0	22,0	56,3	16,5	1250	21,0	4,4	22,0	20,38	Susc.
Среднее / Average, ±2/3σ	37,9±12,85	-	46,8±17,24	-	680±250	-	3,2±0,5	-	-	-
Границы средней области / Limits of average zone	25,05–50,75	-	29,56–64,04	-	430–930	-	2,7–3,7	-	-	-
HCP / LSD, p < 0,01	25,70	-	34,48	-	500	-	1,0	-	-	-
Экономический порог вредоносности (ЭПВ) The economic threshold of harmfulness (ETH)	5–10	-	-	-	200–300	-	1,5	-	-	-
Кратность к уровню ЭПВ / Multiplicity to ETH level	3,8–7,6	-	-	-	2,3–3,4	-	2,1	-	-	-

Средневзвешенный индекс устойчивости для 23 сортов: $1\pm 2/3\sigma = 12,00\pm 3,09$ / The average resistant index for 23 cultivars: $1\pm 2/3\sigma = 12,00\pm 3,09$
*Устойчивые сорта (Res.): $I < 8,91$; **Неустойчивые сорта (Susceptible cultivars (Susc.): $I > 15,09$

Наиболее предпочитаемы сорта Садон и Рубин (53,0 и 87,5 жуков, 68,8 и 134,5 кладки) при значимости различий с непредпочитаемыми сортами на уровне $p < 0,01$. Характер воздействия свойств растений на питающихся и развивающихся на них насекомых в данном опыте оценивается по уровню численности личинок старших возрастов и степени (баллу) поврежденности листового аппарата. Минимальные значения данных показателей отмечены для устойчивых контрольных сортов Наяда и Сиреневый Туман (250–310 личинок на 100 кустов

при поврежденности растений 1,9–2,1 балла), а максимальные значения (1250–1630 личинок и балл поврежденности 3,8–4,4) – для впервые изучавшихся сортов Флагман и Ариэль.

Анализ суммарных результатов полевого скрининга сортов на устойчивость к колорадскому жуку, полученных двумя полевыми методами по совокупности 8 биоэкологических показателей (табл. 3), позволяет дать сравнительную характеристику изучавшихся сортов по представленности у них различных механизмов устойчивости.

Таблица 3 – Сравнительные и суммарные результаты оценки сортов картофеля на устойчивость к колорадскому жуку двумя полевыми методами (опытные поля АФИ и ВИЗР, 2024 г.) /

Table 3 – Comparative and total results of the evaluation of potato cultivars for resistance to the Colorado potato beetle by two field methods (Fields of VIZR and AFI, 2024)

Сорта картофеля / Potato cultivars	Индекс устойчивости – средний ранг сорта / The resistance index – average range of the cultivar		
	искусственное заселение растений вредителем: поле ВИЗР / artificial colonization of plants by the pest: field of VIZR	естественный фон заселения растений вредителем: поле АФИ / natural background of plant colonization by the pest: field of APhI	суммарно / total
Конкурент / 'Konkurent'	8,63	11,00	9,82
Амур / 'Amur'	12,62	8,88	10,75
Командор / 'Komandor'	9,38	11,12	10,25
Гулливвер / 'Gulliver'	9,12	8,25	8,68
Невский / 'Nevsky'	18,25	12,75	15,50
Наяда / 'Nayada'	4,63	2,00	3,32
Беркут / 'Berkut'	7,87	13,00	10,44
Сиреневый Туман / 'Sirenevy Tuman'	8,13	3,50	5,81
Форвард / 'Forvard'	18,37	16,00	17,19
Гренадер / 'Grenader'	5,63	14,87	10,25
Пионер / 'Pioner'	4,87	11,50	8,18
Балтик Роуз / 'Baltic Rose'	15,25	8,25	11,75
Флагман / 'Flagman'	9,75	18,13	13,94
Рубин / 'Rubin'	20,25	17,25	18,75
Навигатор / 'Navigator'	11,13	17,75	14,44
Моряк / 'Moryak'	12,12	11,75	11,94
Ред Фантази / 'Red Fantasy'	8,50	6,12	7,31
Дальневосточный / 'Dalnevostochny'	16,25	11,88	14,06
Фиделия / 'Fidelia'	8,38	7,25	7,82
Сарма / 'Sarma'	16,12	14,37	15,25
Альфа / 'Alpha'	20,75	13,25	17,00
Садон / 'Sadon'	13,75	16,75	15,25
Ариэль / 'Ariel'	16,25	20,38	18,31
Средневзвешенный индекс $I \pm 2/3\sigma$ / The average resistant index $I \pm 2/3\sigma$	12,00 $\pm$ 3,19	12,00 $\pm$ 3,09	12,00 $\pm$ 2,70
Сорта / Cultivars:			
- устойчивые / resistant	I < 8,81	I < 8,91	I < 9,30
- неустойчивые / susceptible (non-resistant)	I > 15,19	I > 15,09	I > 14,70

Сорта Наяда, Сиреневый Туман, Ред Фэнтази и Фиделия подтвердили в 2024 г. ранее выявленную устойчивость к вредителю, имея наиболее высокие значения индекса устойчивости как суммарно по двум опытам (значения I у этих сортов от 3,32 до 7,82), так и в каждом из двух опытов в отдельности (табл. 3). Это свидетельствует, что данные сорта сочетают в одном генотипе разнообразные признаки устойчивости (иммуногенетические барьеры и механизмы) различной биологической природы и благодаря этому обладают наиболее надежной системой естественной самозащиты.

Из числа более новых, впервые изучавшихся сортов устойчивы к вредителю по суммарным данным Гулливер и Пионер, а по критериям низкой выживаемости особей – Конкурент, Беркут и Гренадер (табл. 3). Последние 3 сорта, несмотря на средний уровень их избирательности жуками для размножения (табл. 2), являются неблагоприятным кормом для развития фитофага, вызывая значительную элиминацию личинок либо куколок и низкий процент окрыления имаго нового поколения (1,3–15,1 %) (табл. 1). Такие эффекты депрессирующего (антибиотического) воздействия кормового растения на развивающихся особей, как отмечено выше, обычно обусловлены содержанием в листьях вторичных физиологически активных веществ в повышенных концентрациях, а также трудногидролизуемых структур биополимеров пищи либо присутствием белков-ингибиторов пищеварительных ферментов насекомого.

С другой стороны, имеются сорта, которые относительно слабо (не выше среднего уровня) привлекают взрослых жуков для питания и размножения, однако благоприятны для питания и развития личинок. Примеры – сорт Невский, а из впервые изучавшихся – Сарма и Альфа, имевшие в разных опытах как высокий процент выживших личинок и вышедших имаго (табл. 1), так и высокую численность личинок и балл поврежденности ботвы (табл. 2). Эти 3 сорта, а также Рубин и впервые изучавшиеся Форвард, Ариэль и Садон отнесены по совокупности показателей к группе неустойчивых сортов (табл. 3). Последние 4 сорта благо-

приятны как для размножения имаго, так и для развития личинок. Очевидно, что по сравнению с устойчивыми сортами они практически не обладают естественными механизмами самозащиты от колорадского жука.

Заключение. Результаты исследований 2024 г., проведенных на опытных полях ВИЗР и АФИ, свидетельствуют о несомненных преимуществах параллельного изучения одинакового набора образцов картофеля на устойчивость к колорадскому жуку двумя полевыми методами: 1) с применением искусственного заселения растений личинками вредителя; 2) с размещением опытного участка в естественном очаге колорадского жука. Критерии отбора устойчивых сортов в каждом из них специфичны и характеризуют различные стороны воздействия кормового растения на фитофага. В связи с этим два рассмотренных полевых метода сортооценки взаимно дополняют друг друга и позволяют более объективно, чем каждый метод в отдельности, выделить и охарактеризовать наиболее устойчивые к колорадскому жуку образцы картофеля, сочетающие в одном генотипе барьеры и механизмы самозащиты, различные по своей природе.

По результатам изучения двумя методами подтверждают свою устойчивость к вредителю сорта Наяда, Сиреневый Туман, Ред Фэнтази и Фиделия, имеющие наиболее высокие значения суммарного индекса устойчивости от 3,32 до 7,82. Очевидно, что данные сорта сочетают в одном генотипе признаки устойчивости различной биологической природы. Из числа более новых, впервые изучавшихся сортов выделены устойчивые сорта Гулливер, Пионер, Конкурент, Беркут и Гренадер, которые являются неблагоприятным кормом для питания личинок и вызывают значительную элиминацию личинок, куколок и низкий процент окрыления имаго нового поколения в пределах 1,3–15,1 %. Названные сорта могут быть предложены для преимущественного возделывания в зонах массового распространения и высокой вредоносности колорадского жука в качестве основы систем интегрированной защиты картофеля от вредителя, отвечающих требованиям экологической безопасности.

Список литературы

1. Павлюшин В. А., Вилкова Н. А., Сухорученко Г. И., Нефедова Л. И., Фасулати С. Р. Фитосанитарная дестабилизация агроэкосистем. СПб.: «Родные просторы», 2013. 184 с.
2. Fasulati S. R., Ivanova O. V., Rubtsova L. E. Intraspecific divergence of the Colorado beetle on the territory of the USSR and Russia. IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2021;937(2):022009. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/2/022009>
3. Мацишина Н. В., Рогатных Д. Ю. Инвазия колорадского жука на Дальнем Востоке. Вестник защиты растений. 2013;(4):64–68.

4. Шапиро И. Д. Иммуитет полевых культур к насекомым и клещам. Л.: Зоологический ин-т АН СССР, 1985. 320 с.
5. Вилкова Н. А., Неведова Л. И., Асякин Б. П., Конарев Ал. В., Верещагина А. Б., Иванова О. В. и др. Принципы и методы выявления источников групповой и комплексной устойчивости основных сельскохозяйственных культур к вредным организмам. Технология использования сортов и гибридов сельскохозяйственных культур с групповой и комплексной устойчивостью к болезням и вредителям в защите растений. СПб.: ВНИИ защиты растений РАСХН, 2009. 88 с.
6. Maharijaya A., Vosman B. Managing the Colorado potato beetle; the need for resistance breeding. *Euphytica*. 2015;204(3):487–501. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10681-015-1467-3>
7. Giordanengo Ph., Vincent Ch., Alyokhin A. V. (eds). *Insect Pests of Potato: Global Perspectives on Biology and Management*. Acad. Press, Elsevier, 2013. 598 p.
8. Фасулати С. Р., Иванова О. В. Роль абиотических факторов в ограничении распространения колорадского жука на Северо-Западе России. *Вестник защиты растений*. 2018;(4(98)):27–30. DOI: [https://doi.org/10.31993/2308-6459-2018-4\(98\)-27-30](https://doi.org/10.31993/2308-6459-2018-4(98)-27-30) EDN: VUUTAB
9. Смур В. В. Многолетняя динамика численности и сезонное развитие колорадского жука на посадках картофеля в Ленинградской области в условиях потепления климата. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2024;25(3):407–414. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.407-414> EDN: TKWAOD
10. Лебедева В. А., Гаджиев Н. М. О. Оценка повреждаемости колорадским жуком некоторых сортов картофеля. *Труды Кубанского государственного аграрного университета*. 2018;(72):232–235. DOI: <https://doi.org/10.21515/1999-1703-72-232-235> EDN: XYNPID
11. Молявко А. А., Марухленко А. В., Борисова Н. П., Зейрук В. Н., Абросимов Д. В., Абашкин О. В. Механизмы устойчивости картофеля к колорадскому жуку. *Защита и карантин растений*. 2021;(2):15–18. DOI: https://doi.org/10.47528/1026-8634_2021_2_15 EDN: LTSTEU
12. Clements J., Bradford B. Z., Lipke M., Groves R. L., Jansky S., Olson J. Difference in foliar fatty acid composition in potato cultivars over a growing season may influence the host location preference of *Leptinotarsa decemlineata*. *American Journal of Potato Research*. 2022;99(1):40–47. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12230-021-09857-w>
13. Wen G., Khelifi M., Cambouris A. N., Ziadi N. Responses of the Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) to the chemical composition of potato plant foliage. *Potato Research*. 2019;62(2):157–173. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11540-018-9405-0>
14. Ibragimov R. I., Mardanshin I. S., Benkovskaya G. V., Udalov M. B., Shpirnaya I. A., Tsvetkov V. O. Hydrolytic enzyme inhibitors and necrotic reactions in potato leaves reduce reproductive success of Colorado potato beetle. *Journal of Agricultural Science and Technology A*. 2014;(4):331–341. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26026161> EDN: VXNUJX
15. Ghassemi-Kahrizheh A., Nouri-Ganbalani G., Shayesteh N., Bernousi I. Antibiosis effects of 20 potato cultivars to the Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata* Say (Coleoptera, Chrysomelidae). *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 2010;8(3):795–799. URL: https://www.researchgate.net/publication/287775415_Antibiosis_effects_of_20_potato_cultivars_to_the_Colorado_potato_beetle_Leptinotarsa_decemlineata_Say_Col_Chrysomelidae
16. Марданшин И. С., Сорокань А. В., Гордеев А. А., Беньковская Г. В. Метод определения сверхчувствительного ответа растений картофеля на кладки колорадского жука для использования в селекционной работе. *Экобиотех*. 2021;4(4):255–262. DOI: <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2021-4-4-255-262> EDN: HOEZVD
17. Фасулати С. Р., Иванова О. В. Устойчивость возделываемых и перспективных сортов картофеля и баклажана к колорадскому жуку. *Картофель и овощи*. 2023;(2):32–36. DOI: <https://doi.org/10.25630/PAV.2023.45.37.004> EDN: OCBKLI
18. Иванова О. В., Фасулати С. Р. Принципы и методы отбора устойчивых к колорадскому жуку форм картофеля и овощных пасленовых культур. *Защита и карантин растений*. 2016;(10):12–16. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26738471> EDN: WNDBNH
19. Марданшин И. С. Совершенствование методики отбора при селекции картофеля на устойчивость к колорадскому картофельному жуку. *Картофель и овощи*. 2021;(11):25–28. DOI: <https://doi.org/10.25630/PAV.2021.40.15.004> EDN: CXUUXA

References

1. Pavlyushin V. A., Vilkova N. A., Sukhoruchenko G. I., Nefedova L. I., Fasulati S. R. Phytosanitary destabilization of agroecosystems. Saint-Petersburg: «*Rodnye prostory*», 2013. 184 p.
2. Fasulati S. R., Ivanova O. V., Rubtsova L. E. Intraspecific divergence of the Colorado beetle on the territory of the USSR and Russia. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*. 2021;937(2):022009. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/937/2/022009>
3. Matsishina N. V., Rogatnykh D. Yu. Invasion of the Colorado Potato beetle in the Far East. *Vestnik zashchity rasteniy* = Plant Protection News. 2013;(4):64–68. (In Russ.).
4. Shapiro I. D. Immunity of field crops to insects and mites. Leningrad: *Zoologicheskii in-t AN SSSR*, 1985. 320 p.
5. Vilkova N. A., Nefedova L. I., Asyakin B. P., Konarev Al. V., Vereshchagina A. B., Ivanova O. V. et al. Principles and methods of identifying sources of group and complex resistance of major crops to harmful organisms. Technology of using cultivars and hybrids of agricultural crops with group and complex resistance to diseases and pests in plant protection. Saint-Petersburg: *VNI zashchity rasteniy RASKhN*, 2009. 88 p.

6. Maharijaya A., Vosman B. Managing the Colorado potato beetle; the need for resistance breeding. *Euphytica*. 2015;204(3):487–501. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10681-015-1467-3>
7. Giordanengo Ph., Vincent Ch., Alyokhin A. V. (eds). *Insect Pests of Potato: Global Perspectives on Biology and Management*. Acad. Press, Elsevier, 2013. 598 p.
8. Fasulati S. R., Ivanova O. V. Role of environmental abiotic factors in limiting the colorado potato beetle distribution in northwestern Russia. *Vestnik zashchity rasteniy* = Plant Protection News. 2018;(4(98)):27–30. (In Russ.). DOI: [https://doi.org/10.31993/2308-6459-2018-4\(98\)-27-30](https://doi.org/10.31993/2308-6459-2018-4(98)-27-30)
9. Smuk V. V. Long-term population dynamics and seasonal development of the Colorado potato beetle on potato plantings in the Leningrad region under conditions of climate warming. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(3):407–414. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.3.407-414>
10. Lebedeva V. A., Gadzhiev N. M. O. Evaluation of the colorado beetle injury for some potato cultivars. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2018;(72):232–235. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21515/1999-1703-72-232-235>
11. Molyavko A. A., Marukhlenko A. V., Borisova N. P., Zeyruk V. N., Abrosimov D. V., Abashkin O. V. Mechanisms of potato resistance to *Leptinotarsa decemlineata*. *Zashchita i karantin rasteniy*. 2021;(2):15–18. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.47528/1026-8634_2021_2_15
12. Clements J., Bradford B. Z., Lipke M., Groves R. L., Jansky S., Olson J. Difference in foliar fatty acid composition in potato cultivars over a growing season may influence the host location preference of *Leptinotarsa decemlineata*. *American Journal of Potato Research*. 2022;99(1):40–47. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12230-021-09857-w>
13. Wen G., Khelifi M., Cambouris A. N., Ziadi N. Responses of the Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) to the chemical composition of potato plant foliage. *Potato Research*. 2019;62(2):157–173. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11540-018-9405-0>
14. Ibragimov R. I., Mardanshin I. S., Benkovskaya G. V., Udalov M. B., Shpirmaya I. A., Tsvetkov V. O. Hydrolytic enzyme inhibitors and necrotic reactions in potato leaves reduce reproductive success of Colorado potato beetle. *Journal of Agricultural Science and Technology A*. 2014;(4):331–341. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26026161> EDN: VXNUJX
15. Ghassemi-Kahrizreh A., Nouri-Ganbalani G., Shayesteh N., Bernousi I. Antibiosis effects of 20 potato cultivars to the Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata* Say (Coleoptera, Chrysomelidae). *Journal of Food, Agriculture and Environment*. 2010;8(3):795–799. URL: https://www.researchgate.net/publication/287775415_Antibiosis_effects_of_20_potato_cultivars_to_the_Colorado_potato_beetle_Leptinotarsa_decemlineata_Say_Col_Chrysomelidae
16. Mardanshin I. S., Sorokan' A. V., Gordeev A. A., Ben'kovskaya G. V. Method for determining the hyper sensitive response of potato plants to clusters of the colorado potato beetle eggs for use in breeding. *Ekobiotech* = Ecobiotech. 2021;4(4):255–262. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2021-4-4-255-262>
17. Fasulati S. R., Ivanova O. V. The resistance of cultivated and perspective of potato and eggplant varieties to the colorado beetle. *Kartofel' i ovoshchi* = Potato and Vegetables. 2023;(2):32–36. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25630/PAV.2023.45.37.004>
18. Ivanova O. V., Fasulati S. R. Principles and methods of selection of potato forms and vegetable solanaceous crops resistant to the colorado potato beetle. *Zashchita i karantin rasteniy*. 2016;(10):12–16. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26738471>
19. Mardanshin I. S. Improvement of the selection method for potato breeding for resistance to the colorado potato beetle. *Kartofel' i ovoshchi* = Potato and Vegetables. 2021;(11):25–28. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25630/PAV.2021.40.15.004>

Сведения об авторах

✉ **Фасулати Сергей Радиевич**, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории сельскохозяйственной энтомологии, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений», шоссе Подбельского, д. 3, г. Санкт-Петербург, Пушкин, Российская Федерация, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7345-364X>, e-mail: fasulatiser.spb@mail.ru

Иванова Ольга Вениаминовна, кандидат биол. наук, ведущий специалист лаборатории сельскохозяйственной энтомологии, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений», шоссе Подбельского, д. 3, г. Санкт-Петербург, Пушкин, Российская Федерация, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4789-9194>

Information about the authors

✉ **Sergey R. Fasulati**, PhD in Biology, senior researcher, the Laboratory of Agricultural Entomology, All-Russian Institute of Plant Protection, Podbelskogo, 3, Saint-Petersburg, Pushkin, Russian Federation, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7345-364X>, e-mail: fasulatiser.spb@mail.ru

Olga V. Ivanova, PhD in Biology, leading researcher, the Laboratory of Agricultural Entomology, All-Russian Institute of Plant Protection, Podbelskogo, 3, Saint-Petersburg, Pushkin, Russian Federation, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4789-9194>

✉ – Для контактов / Corresponding author



Динамика ухудшения фитосанитарных показателей клубней с приростом продуктивности картофеля в предуборочный период вегетации

© 2025. В. В. Смук✉

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений»,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Определение оптимального срока уборки посадок картофеля относится к одной из основных проблем картофелеводства. Существенной задачей при этом является изучение динамики развития массовых почвообитающих вредителей и фитопатогенов в предуборочный период с целью сокращения потерь качества клубней на фоне нарастания урожая культуры. Исследования проводили в 2022–2024 гг. в зернотравянопропашном севообороте агроэкологического стационара (Ленинградская область) в посадках раннеспелого сорта картофеля Метеор (предшественник – рапс). Наблюдения за фитосанитарными параметрами, количеством и массой клубней осуществляли по общепринятым методикам в динамике – на 70, 80, 90-й день после посадки. По результатам исследований выявлено, что в предуборочный период количество клубней, поврежденных личинками жуков-щелкунов, увеличилось с 20,7 до 38,3 %, пораженность паршой обыкновенной и ризоктониозом возросла от 17,3 до 30,5 % и от 16,7 до 38,0 % соответственно. Максимальную интенсивность данных процессов наблюдали с 80-го по 90-й день после посадки: поврежденность клубней личинками жуков-щелкунов возросла в 1,4 раза, степень развития парши обыкновенной – 1,3 раза, ризоктониоза – в 2,5 раза. Установлено, что в условиях Ленинградской области уборка раннего сорта Метеор через 70 дней после посадки не оправдана в связи с малой массой клубней с растения (72 % в сравнении с уборкой на 90-й день). Высокие темпы увеличения продуктивности картофеля отмечены в период с 70-го по 80-й день после посадки с формированием в среднем 88,1 % от максимально возможного урожая. Целесообразность более продолжительного возделывания культуры просматривалась только в один год из трех. Таким образом, оптимальным решением при возделывании сорта Метеор в регионе проведения исследований является уборка через 80 дней после посадки, позволяющая существенно сократить потери товарности клубней культуры при высоком итоговом уровне её продуктивности.

Ключевые слова: *Solanum tuberosum* L., вредные организмы, сроки уборки, продуктивность растений, личинки жуков-щелкунов, парша обыкновенная, ризоктониоз

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки в рамках Государственного задания ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (тема № FGEG-2025-0007) и Государственного задания ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений» (тема № FGEU-2025-0008).

Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Смук В. В. Динамика ухудшения фитосанитарных показателей клубней с приростом продуктивности картофеля в предуборочный период вегетации. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(4):807–815. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.807-815>

Поступила: 26.05.2025

Принята к публикации: 08.07.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

Dynamics of deterioration of phytosanitary indicators of tubers with an increase in potato productivity during the pre-harvest vegetation period

© 2025. Vasilii V. Smuk✉

Agrophysical Research Institute, Saint-Petersburg, Russian Federation,

All-Russian Institute of Plant Protection, Saint-Petersburg, Russian Federation

Determining the optimal harvest time for potato plantings is one of the main problems of potato growing. An essential task in this case is to study the dynamics of the development of massive soil-dwelling pests and phytopathogens during the pre-harvest period in order to reduce the loss of tuber quality against the background of an increase in crop yield. The research was carried out in 2022–2024 in the grain-and-grass crop rotation of the agroecological study area (Leningrad region) in the planting of the early-ripening Meteor potato cultivar (the predecessor is rapeseed). Observations of phytosanitary parameters, the number and weight of tubers were carried out according to generally accepted methods in dynamics – on the 70th, 80th, 90th day after planting. According to the research results, during the pre-harvest period, the number of tubers damaged by the larvae of click beetles increased from 20.7 to 38.3 %, the incidence of scab and rhizoctoniosis increased from 17.3 to 30.5 % and from 16.7 to 38.0 %, respectively. The maximum intensity of these processes was observed from the 80th to the 90th day

after planting: damage to tubers by larvae of click beetles increased 1.4 times, the degree of development of scab – 1.3 times, rhizoctoniosis – 2.5 times. It was found that in the conditions of the Leningrad region, harvesting an early Meteor cultivar 70 days after planting is not justified due to the low mass of tubers from the plant (72 % compared with harvesting on the 90th day). High rates of increase in potato productivity are observed in the period from the 70th to the 80th day after planting, with an average of 88.1 % of the maximum possible yield. The expediency of longer cultivation of the crop was seen only in one year out of three. Thus, the optimal solution for cultivating the Meteor cultivar in the research region is harvesting 80 days after planting, which significantly reduces the loss of marketability of the tubers of the crop with a high final level of productivity.

Keywords: *Solanum tuberosum* L., harmful organisms, harvesting time, plant productivity, larvae of click beetles, scab, rhizoctoniosis

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 Agrophysical Research Institute (theme No. FGEG-2025-0007) and state assignment of the All-Russian Scientific Research Institute of Plant Protection (theme No. FGEU-2025-0008).

The author thanks the reviewers for their contribution to the expert evaluation of this work.

Conflict of interests: the author stated that there was no conflict of interests.

For citations: Smuk V. V. Dynamics of deterioration of phytosanitary indicators of tubers with an increase in potato productivity during the pre-harvest vegetation period. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):807–815. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.807-815>

Received: 26.05.2025

Accepted for publication: 08.07.2025

Published online: 29.08.2025

Картофель относится к полевым культурам, формирующим максимальный уровень товарной продуктивности в условиях продолжительного периода вегетации. Вместе с тем в современных реалиях потепления климата завершающий этап развития картофельного агроценоза подвержен серьезным фитосанитарным рискам [1]. Высокая вероятность развития эпифитотии фитофтороза, массового заражения растений картофеля вирусами и нарастания степени развития ризоктониоза на клубнях картофеля обуславливает научные рекомендации более ранних сроков уборки культуры [2, 3]. Также к серьезному уменьшению уровня товарности картофеля могут привести повреждения клубней личинками жуков-щелкунов и значительная степень пораженности урожая культуры паршой обыкновенной.

Для условий Ленинградской области тенденция потепления климата впервые была отмечена в 1970-х годах, а с начала XXI века приобрела характер многолетнего тренда с периодически обновляющимися рекордными показателями теплообеспеченности данной территории [4]. В результате климатические изменения на территории данной области привели к увеличению продолжительности летнего периода в среднем на 20 дней с регистрацией устойчивого перехода температуры через 15 °C не ранее первой декады сентября [5]. По отношению к очень ранним сортам картофеля продление периода активной вегетации обуславливает возможность дифференцированного подхода к срокам уборки в зависимости от интенсивности продукционного процесса на ранней стадии клубнеобразования и степени развития вредных организмов в посадках культуры.

Цель исследований – изучить динамику показателей фитосанитарного состояния клубней и продуктивности растений картофеля сорта Метеор в предуборочный период вегетации для уточнения оптимальных сроков уборки в условиях Ленинградской области.

Научная новизна – выявлены особенности ухудшения фитосанитарных показателей клубней и нарастания продуктивности картофеля раннего сорта Метеор в предуборочный период вегетации на территории Ленинградской области. Отмечено разное по силе возрастание степени развития почвенных вредных организмов на протяжении первых и вторых 10 дней предуборочного периода вегетации картофеля, определяемое начальной инфекционной нагрузкой на посадочном материале и условиями тепло-влажностности. На основании полученных данных по ухудшению фитосанитарного состояния клубней и нарастания продуктивности картофеля определены оптимальные сроки его уборки.

Материал и методы. Исследования проводили в агроэкологическом стационаре Меньковского филиала Агрофизического института (Ленинградская обл., Гатчинский район) в период 2022–2024 гг. Стационар функционирует с 1982 г. и представляет собой 7-польный зернотравяно-пропашной севооборот, предшественником картофеля служил рапс яровой. Площадь севооборота 4,2 га, одного поля – 0,6 га.

Почвенный покров сформирован дерново-слабоподзолистыми легкосуглинистыми почвами. Физико-химические и агрохимические свойства в пахотном горизонте стационара

варьировали в следующих пределах: pH_{KCl} – 4,51–4,73¹, содержание органического вещества – 3,05–3,75 %², подвижных соединений фосфора и калия – 208–268 и 88–98 мг/кг почвы соответственно (по методу Кирсанова)³.

В изучении находился очень ранний сорт картофеля Метеор⁴. Урожайность на 45-й день после полных всходов (первая копка) – 17,5–21,3 т/га. По данным оригинатора, относительно устойчив по листьям и высокоустойчив по клубням к возбудителю фитофтороза.

В первый год проведения опыта использовали посадочный материал категории «элита», в последующие годы – первой и второй репродукции соответственно. При возделывании картофеля в опыте ежегодно вносили полное минеральное удобрение из расчета $N_{65}P_{50}K_{50}$. Мероприятия по защите посадок от сорных растений заключались в проведении двух довсходовых сплошных и двух послевсходовых междурядных обработок ротационной бороной БРУ-0,7, а также окучивания. Химические средства защиты растений, в том числе протравители, не применяли. Посадку картофеля осуществляли 20, 15 и 22 мая в 2022, 2023 и 2024 гг. соответственно. Фитосанитарные параметры и массу клубней определяли на 70-й, 80 и 90-й день после посадки (конец июля – первые две декады августа) по общепринятым методикам^{5,6}. В 2022 г. клубневой анализ проводили 30 июля, 9 и 19 августа, 2023 г. – 25 июля, 4 и 14 августа, 2024 г. – 2, 12 и 22 августа.

Для клубневого анализа в динамике на одних и тех же 12 равноудаленных местах на поле отбирали по 4 растения картофеля. Определяли общее количество и массу клубней в каждой пробе, а также долю поврежденных клубней и среднее количество ходов личинок жуков-щелкунов, пораженность и интенсивность поражения клубней ризоктониозом

и паршой обыкновенной. Для определения интенсивности поражения клубней данными болезнями пользовались соответствующими балльными шкалами оценки⁷. Статистическую обработку данных проводили методом дисперсионного анализа с использованием программы Statistica 6.

В настоящее время в связи с наблюдаемым потеплением климата на территории Ленинградской области регистрируется существенное многолетнее повышение температуры воздуха в период активной вегетации картофеля. На месте проведения исследований в 2021 г. наблюдали пиковое значение суммы активных температур – 1723 °С, в 2022–2024 гг. – некоторое ее снижение и стабилизацию на уровне 1605–1632 °С. В итоге превышение среднемноголетних показателей теплообеспеченности летних месяцев в период исследований составило 15–17 %.

Вегетационный период картофеля на территории Ленинградской области в целом характеризуется достаточными условиями увлажнения. Одновременно наблюдается существенная неравномерность в распределении осадков – повышенная вероятность недостаточного режима увлажнения в первую половину вегетации культуры и избыточное увлажнение в августе. Недостаток осадков в июне и июле в разной степени регистрировали в течение всего периода исследований, пик отмечали в 2023 г., когда количество осадков составило 96,6 мм, или 57,5 % от среднемноголетней нормы (табл. 1). Погодные условия предуборочного периода вегетации картофеля варьировали от засушливых, когда за период с 70-го по 90-й день после посадки суммарно выпадало 28,3 и 32,1 мм (2022 и 2023 гг.), до избыточно увлажненных (70,6 мм – в 2024 г.). Крайняя неравномерность выпадающих осадков отмечена в 2022 г.

¹ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение pH по методу ЦИНАО. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1985. 6 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/738/4294827946.pdf>

²ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 11 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/758/75803.pdf>

³ГОСТ Р 54650-2011. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия (метод Кирсанова в модификации ЦИНАО). М.: Стандартинформ, 2013. 11 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/32d/4293788445.pdf>

⁴Сорт картофеля Метеор: описание. [Электронный ресурс]. URL: <https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektcionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/meteor-kartofel/?ysclid=mcn9uh9zq1817472456> (дата обращения 08.07.2025)

⁵Методические указания по регистрационным испытаниям инсектицидов, акарицидов, моллюскоцидов и родентицидов в сельском хозяйстве. СПб., 2009. 322 с.

⁶Методические указания по регистрационным испытаниям фунгицидов в сельском хозяйстве. СПб., 2009. 378 с.

⁷Там же.

Таблица 1 – Динамика среднесуточных температур и суммы осадков за период вегетации картофеля сорта Метеор в годы исследований /

Table 1 – Dynamics of average daily temperatures and precipitation during the growing season of Meteor potato cultivar during the years of research

Год / Year	Показатель / Indicator	Период после посадки / Period after planting		
		до 70-го дня / up to the 70th day	до 80-го дня / up to the 80th day	до 90-го дня / up to the 90th day
2022	Температура воздуха, °C / Air temperature, °C	16,4	17,6	20,0
	Сумма осадков, мм / Amount of rainfall, mm	138,5	28,3	0,0
2023	Температура воздуха, °C / Air temperature, °C	16,1	19,9	18,9
	Сумма осадков, мм / Amount of rainfall, mm	96,6	20,5	11,6
2024	Температура воздуха, °C / Air temperature, °C	17,9	16,6	16,4
	Сумма осадков, мм / Amount of rainfall, mm	158,7	44,3	26,3
Среднее многолетнее / Average long-term	Температура воздуха, °C / Air temperature, °C	15,2	16,5	14,9
	Сумма осадков, мм / Amount of rainfall, mm	168,0	30,3	24,1

Результаты и их обсуждение. Для максимально полной реализации потенциальной товарности картофеля определяющее значение имеет вторая половина вегетации культуры. В этот период параллельно с увеличением массы клубней происходит развитие почвенных вредных организмов, среди которых по частоте и массовости присутствия в посадках выделяются личинки жуков-щелкунов, увеличивается пораженность клубней картофеля паршой обыкновенной и ризоктониозом. Допустимые параметры каждого из них строго прописаны в нормативных документах (ГОСТ⁸), а исследования с целью уточнения динамики их развития для конкретной территории возделывания картофеля имеют несомненную научную значимость и практическую актуальность.

Итоговые показатели поврежденности клубней картофеля нового урожая личинками жуков-щелкунов в значительной степени определялись первоначальной плотностью их обитания в пахотном горизонте на момент посадки культуры. Учет перед посадкой картофеля выявил наличие 104, 15 и 29 лич./м² соответственно в 2022, 2023 и 2024 гг. При этом поврежденность клубней во время первого учета варьировала от 1,9 % в 2023 г. до 34,8 % в 2022 г., а среднее количество ходов в клубне –

от 1,3 до 2,6 шт/клубень. Наблюдаемая зависимость, по-видимому, связана с тем, что для большинства видов проволочника, обитающих в Северном полушарии, в вегетационный период картофеля характерны два пика активности, совпадающие по времени с периодом посадки картофеля, фазой роста и развития клубней в августе [6]. Повышенная пищевая активность вредителя в предуборочный период вегетации приводит к нарастанию степени повреждения клубней картофеля при более поздних сроках уборки культуры [7]. При этом в научной литературе подчеркивается недостаточная детализация изученности данного аспекта жизнедеятельности жуков-щелкунов. Так, в одном из зарубежных исследований о влиянии сроков уборки на качество картофеля приводятся данные по количеству поврежденных клубней личинками жуков-щелкунов по двум учетам: от 8–50 % в конце июля – начале августа до 72–77 % в сентябре [8]. По нашим данным, поврежденность клубней в период с 70-го по 80-й день после посадки увеличилась в среднем по годам в 1,3 раза и в 1,4 раза – с 80-го по 90-й день. Нарастание среднего количества ходов личинок жуков-щелкунов в разной степени фиксировали в заключительный 10-дневный период вегетации с варьированием в широких пределах от 1,1 раза в 2023 г. до 1,7 раза в 2024 г. (табл. 2).

⁸ГОСТ 33996-2016. Картофель семенной. Технические условия и методы определения качества. М.: Стандартинформ, 2017. 35 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/53d/4293748329.pdf>; ГОСТ 7176-2017. Картофель продовольственный. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2018, 16 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293740/4293740954.pdf>

Таблица 2 – Динамика повреждения клубней картофеля сорта Метеор личинками жуков-щелкунов в предуборочный период вегетации /

Table 2 – Dynamics of damage to tubers of the Meteor potato cultivar by larvae of click beetles in the pre-harvest period of vegetation

Год / Year	Поврежденность клубней, % / Damage to tubers, %				Количество ходов в клубне, шт. / The number of moves in the tuber, pcs.			
	70-й день / the 70th day	80-й день / the 80th day	90-й день / the 90th day	HCP ₀₅ / LSD ₀₅	70-й день / the 70th day	80-й день / the 80th day	90-й день / the 90th day	HCP ₀₅ / LSD ₀₅
2022	34,8	48,3	59,6	7,07	2,6	2,4	3,6	0,38
2023	1,9	5,2	6,8	2,32	1,3	1,2	1,3	0,43
2024	25,5	30,3	48,5	14,58	2,2	1,9	3,3	0,95
Среднее / Average	20,7	27,9	38,3	5,76	2,0	1,8	2,7	0,38

Северо-Западный регион РФ характеризуется высокой вредоносностью и повсеместным распространением парши обыкновенной [9]. Патогенез заболевания зависит от большого количества абиотических и биотических факторов, в различной степени проявляющихся на протяжении вегетации картофеля. Важнейшими среди них являются теплообеспеченность посадок во время клубнеобразования, степень пораженности фитопатогеном посадочного материала и наличие инфекционного начала в пахотном горизонте почвы [10, 11]. В настоящее время отмечено общее нарастание вредоносности обыкновенной парши [12]. Существенное увеличение суммы активных температур, наблюдаемое в месте проведения

наших опытов с 2021 г., привело к многократному увеличению уровня поврежденности клубней паршой в момент уборки по сравнению с зафиксированным в 2012–2016 гг. [13]. В 2022, 2023 и 2024 гг., по результатам предпосадочной фитоэкспертизы, доля пораженных клубней паршой составила 20, 25 и 4 % соответственно. Начальный уровень зараженности семенного материала предопределил слабое развитие парши обыкновенной на 90-й день после посадки в 2024 г. и в 1,4–1,5 раза более сильное в 2022 и 2023 гг. (табл. 3). Увеличение доли пораженных клубней данным заболеванием за весь 20-дневный срок предуборочного периода варьировало по годам от 1,3 до 2,9 раза, развитие болезни – в пределах 1,4–2,6 раза.

Таблица 3 – Динамика поражения клубней картофеля сорта Метеор паршой обыкновенной в предуборочный период вегетации /

Table 3 – The dynamics of damage to tubers of the Meteor potato cultivar by scab during the pre-harvest period of vegetation

Год / Year	Пораженность клубней, % / Tuber infestation, %				Развитие болезни, % / Development of the disease, %			
	70-й день / the 70th day	80-й день / the 80th day	90-й день / the 90th day	HCP ₀₅ / LSD ₀₅	70-й день / the 70th day	80-й день / the 80th day	90-й день / the 90th day	HCP ₀₅ / LSD ₀₅
2022	10,9	25,8	31,4	8,32	2,10	4,30	5,44	2,10
2023	29,8	30,5	39,2	10,20	3,67	4,85	5,04	2,24
2024	11,3	14,3	20,9	5,15	1,38	1,64	3,60	1,55
Среднее / Average	17,3	23,5	30,5	4,63	2,38	3,60	4,69	1,05

По данным наших исследований, степень развития ризоктониоза на клубнях при уборке картофеля во многом обусловлена качеством используемого для посадки материала [14]. Возделывание ранних и среднеранних сортов, имеющих короткий период покоя, также относится к благоприятным факторам для массового развития фитопатогена [15]. Не менее значимым условием появления эпифитотии ризоктониоза

на клубнях является уровень тепло- и влагообеспеченности посадок картофеля [16]. В 2022–2023 гг. по результатам предпосадочной фитоэкспертизы пораженность клубней ризоктониозом составила 28,0 и 33,0 % соответственно. Сопоставимыми в эти годы оказались итоговые показатели развития заболевания, составившие 2,30–2,34 %, но динамика имела свои отличия. При достаточном количестве

выпавших осадков в 2022 г. на 70-й день после посадки развитие ризоктониоза на клубнях составило 1,12 %, за последующие 10 дней увеличилось до 1,96 %, а в итоге достигло 2,30 %. Острозасушливые погодные условия 2023 г. (57,5 % от среднемноголетней нормы осадков за 70 дней после посадки) негативным образом повлияли на начальное развитие ризоктониоза (0,52 %). При наличии осадков в последующие 20 дней вегетации культуры развитие заболевания возросло в 4,5 раза (табл. 4). В 2024 г.

посадочный материал картофеля отличался сильной зараженностью ризоктониозом (73,0 % пораженных клубней). В 2024 г. под влиянием суммы осадков, превышающей среднемноголетние значения, нарастание инфекции на клубнях в предуборочный период вегетации картофеля происходило более стремительными темпами, особенно в последние 10 дней, что в конечном итоге привело к пораженности 73,0 % клубней и 13,38 % развитию заболевания.

Таблица 4 – Динамика поражения клубней картофеля сорта Метеор ризоктониозом в предуборочный период вегетации /
Table 4 – The dynamics of damage to tubers of the Meteor potato cultivar by rhizoctoniosis in the pre-harvest period of vegetation

Год / Year	Пораженность клубней, % / Tuber infestation, %				Развитие болезни, % / Development of the disease, %			
	70-й день / the 70th day	80-й день / the 80th day	90-й день / the 90th day	HCP ₀₅ / LSD ₀₅	70-й день / the 70th day	80-й день / the 80th day	90-й день / the 90th day	HCP ₀₅ / LSD ₀₅
2022	14,2	17,4	21,0	6,28	1,12	1,96	2,30	0,90
2023	7,2	13,3	20,1	13,59	0,52	1,13	2,34	2,08
2024	28,8	43,0	73,0	17,72	2,30	4,01	13,38	2,14
Среднее / Average	16,7	24,6	38,0	8,76	1,31	2,37	6,01	1,92

В ситуации повышенной опасности массового развития вредных организмов на посадках картофеля возможно проведение более ранней уборки урожая. При этом необходимо учитывать наличие существенного варьирования уровня товарности культуры в зависимости от сроков проведения уборочных мероприятий [17, 18]. По отношению к группе раннеспелых сортов картофеля отмечается требование длительности периода от посадки до уборки не менее 80 дней, что в условиях в Ленинградской области при посадке 20 мая обуславливает уборку карто-

феля не ранее 10 августа [19, 20]. В результате проведенных исследований выявлено значительное увеличение массы клубней с растения на протяжении последних 20 дней вегетации. При этом динамика роста продуктивности с 70-го по 80-й день после посадки характеризовалась более высокими темпами, чем с 80-го по 90-й (табл. 5). Только в один год из трех лет исследований, с точки зрения нарастания продуктивности растений картофеля, оправдана более поздняя уборка, а именно на 90-й день после посадки.

Таблица 5 – Динамика нарастания массы клубней картофеля сорта Метеор в предуборочный период вегетации /
Table 5 – Dynamics of tuber mass increase of Meteor potato cultivar in the pre-harvest period of vegetation

Год / Year	Масса клубней, г/растение / Mass of tubers, g/plant				Увеличение массы клубней за определенный период, % / An increase in the mass of tubers over a certain period, %			
	70-й день / the 70th day	80-й день / the 80th day	90-й день / the 90th day	HCP ₀₅ / LSD ₀₅	с 70-го по 80-й день после посадки / from the 70th to the 80th day after planting		с 80-го по 90-й день после посадки / from the 80th to the 90th day after planting	
					г/растение / g/plant	%	г/растение / g/plant	%
2022	369	480	630	87,9	111	30,1	150	31,3
2023	482	530	558	38,1	48	10,0	28	5,3
2024	513	655	701	66,5	142	27,7	46	7,0
Среднее / Average	455	555	630	43,6	100	22,0	75	11,4

Выводы. 1. По результатам исследований выявлено значительное ухудшение фитосанитарных показателей клубней картофеля в предуборочный период вегетации (70–90-й день после посадки), проявляющееся в увеличении доли поврежденных клубней личинками жуков-щелкунов (в 1,9 раза), развитии на клубнях парши обыкновенной (в 2,0 раза) и ризоктониоза (в 4,6 раза).

2. Анализ динамики продуктивности картофеля раннего сорта Метеор свидетельствует о значительном вкладе в конечную величину урожая периода вегетации культуры

с 70-го по 80-й день после посадки. Прирост продуктивности картофеля за этот период увеличился в 2,0 раза, чем за последующие 10 дней (22 против 11,4 %).

3. В условиях значительного нарастания темпов повреждения клубней личинками жуков-щелкунов (в 1,4 раза), развития парши обыкновенной (в 1,3 раза) и в особенности ризоктониоза (в 2,5 раза) на завершающем этапе вегетации картофеля более оправдана уборка культуры на 80-й день после посадки, когда сформировано 88,1 % продуктивности в сравнении с более поздней датой.

Список литературы

1. Игнатов А. Н., Кошкин Е. И., Андреева И. В., Гусейнов Г. Г., Гусейнов Г. К., Джалилов Ф. С.-У. Влияние глобальных изменений климата на фитопатогены и развитие болезней растений. *Агрохимия*. 2020;(12):81–96. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188120120042> EDN: LSQEPX
2. Молявко А. А., Марухленко А. В., Еренкова Л. А., Борисова Н. П., Абашкин О. В., Абросимов Д. В. Десикация - путь к снижению поражения картофеля болезнями. *Защита и карантин растений*. 2019;(8):18–20. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39193596> EDN: DTIHVG
3. Чехалкова Л. К., Конова А. М., Гаврилова А. Ю. Влияние агротехнических приемов на семенную продуктивность ранних сортов картофеля в конкретных почвенно-климатических условиях Смоленской области. *Аграрный научный журнал*. 2022;(3):46–50. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i3pp46-50> EDN: MBAXUQ
4. Фирсов Г. А., Фадеева И. В. Биоклиматическая цикличность и её влияние на древесные растения в Санкт-Петербурге. *Hortus Botanicus*. 2023;18:244–270. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=59853115> EDN: TRQAPJ
5. Малинин В. Н., Гурьянов Д. А. Межгодовая изменчивость климатических сезонов в Санкт-Петербурге. *Известия Русского географического общества*. 2015;147:17–27. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24322572> EDN: UMGNJJ
6. Джорданенго Ф., Венсан Ш., Алехин А. Насекомые – вредители картофеля. *Мировые перспективы биологии и управления*. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2018. 605 с.
7. Kuhar T. R., Alvarez J. M. Timing of injuri and efficacy of soil-applied insecticides against wireworms on potato in Virginia. *Crop Protection*. 2008;27(3-5):792–798. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.CROPRO.2007.11.011>
8. Neuhoﬀ D., Christen C., Paffrath A., Schepl U. Approaches to wireworm control in organic potato production. *Bulletin-OILB/SROP*. 2007;30:65–68. URL: https://www.researchgate.net/publication/284331552_Approaches_to_wireworm_control_in_organic_potato_production
9. Хютти А. В., Лазарев А. М., Чеботарь В. К. Обыкновенная парша картофеля. *Сельскохозяйственные вести*. 2021;(2(125)):56–57.
10. Braun S., Gevens A., Charkowski A., Allen Ch., Jansky Sh. Potato Common Scab: a Review of the Causal Pathogens, Management Practices, Varietal Resistance Screening Methods, and Host Resistance. *American Journal of Potato Research*. 2017;94(1):283–296. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12230-017-9575-3>
11. Corrêa D. B. A., Amaral D. T., Silva M. J., Destéfano S. A. L. *Streptomyces Brasiliscabiei*, a New Species Causing Potato Scab in South Brazil. *Antonie van Leeuwenhoek*. 2021;114(7):913–931. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10482-021-01566-y>
12. Белов Д. А., Хютти А. В. Современные фитопатогенные комплексы болезней картофеля и меры по предотвращению их распространения в России. *Картофель и овощи*. 2022;(5):18–24. DOI: <https://doi.org/10.25630/PAV.2022.52.94.003> EDN: LYNGFN
13. Шпанев А. М., Смур В. В., Фесенко М. А. Фитосанитарный эффект применения минеральных удобрений в посадках картофеля в Северо-Западном регионе. *Агрохимия*. 2017;(12):38–45. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0002188117120067> EDN: ZUCFUR
14. Смур В. В. Влияние длительного применения минеральных удобрений на поражение клубней картофеля ризоктониозом в условиях Северо-Запада России. *Агрохимический вестник*. 2023;(4):16–21. DOI: <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-4-003> EDN: LYDGPC
15. Белов Г. Л., Зейрук В. Н., Васильева С. В., Деревягина М. К., Шабанов А. Э., Киселев А. И. Распространенность ризоктониоза на различных сортах картофеля в центральном регионе России. *Агрохимический вестник*. 2019;(3):65–67. DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2516-2019-10045> EDN: ZSHCXH

16. Черемисин А. И., Якимова И. А., Елина А. М. Влияние погодных условий на устойчивость сортов картофеля к грибным болезням в питомниках семеноводства. Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2020;(12(194)):10–17.

Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44394255> EDN: COXXMF

17. Владимиров В. П., Шарапова А. Р., Мостякова А. А., Ситникова Н. В. Влияние сроков удаления ботвы на урожай и качество клубней картофеля в условиях лесостепи среднего Поволжья. Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2022;17(1(65)):5–8. DOI: <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2022-5-8> EDN: ZTRPKY

18. Лапшинов Н. А., Рябцева Т. В. Влияние сроков удаления ботвы на качество и продуктивность семенного картофеля. Достижения науки и техники АПК. 2012;(1):19–20.

Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17666171> EDN: OWPHXD

19. Шанин А. А. Влияние сроков уборки на хозяйственно-биологические особенности раннеспелых сортов картофеля. Аграрный вестник Урала. 2007;(4(40)):44–45.

Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9925830> EDN: IJFJUX

20. Кушнарев А. Г., Калашников М. В. Динамика накопления урожая раннего картофеля в степной зоне Бурятии. Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В. Р. Филиппова. 2017;(4(49)):129–134. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30763741> EDN: ZXFGYB

References

1. Ignatov A. N., Koshkin E. I., Andreeva I. V., Guseynov G. G., Guseynov G. K., Dzhililov F. S.-U. Impact of global climate change on plant pathogens occurrence. *Agrokhimiya*. 2020;(12):81–96. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188120120042>

2. Molyavko A. A., Marukhlenko A. V., Erenkova L. A., Borisova N. P., Abashkin O. V., Abrosimov D. V. Dessication – way to minimize potato damage by diseases. *Zashchita i karantin rasteniy*. 2019;(8):18–20. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39193596>

3. Chekhalkova L. K., Konova A. M., Gavrilova A. Yu. The influence of agricultural techniques on the seed productivity of early potato varieties in specific soil and climatic conditions of the Smolensk region. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2022;(3):46–50. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i3pp46-50>

4. Firsov G. A., Fadeeva I. V. Bioclimatic cyclicity and its influence on woody plants at Saint-Petersburg. *Hortus Botanicus*. 2023;18:244–270. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=59853115>

5. Malinin V. N., Gurjanov D. A. The interannual variability of climatic seasons in St. Petersburg. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva* = Proceedings of the Russian Geographical Society. 2015;147:17–27. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24322572>

6. Dzhordanengo F., Vensan Sh., Alekhin A. Insects are pests of potatoes. Global prospects of biology and management. Moscow: *T-vo nauch. izd. KMK*, 2018. 605 p.

7. Kuhar T. R., Alvarez J. M. Timing of injury and efficacy of soil-applied insecticides against wireworms on potato in Virginia. *Crop Protection*. 2008;27(3-5):792–798. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.CROPRO.2007.11.011>

8. Neuhoft D., Christen C., Paffrath A., Schepl U. Approaches to wireworm control in organic potato production. *Bulletin-OILB/SROP*. 2007;30:65–68. URL: https://www.researchgate.net/publication/284331552_Approaches_to_wireworm_control_in_organic_potato_production

9. Khyutti A. V., Lazarev A. M., Chebotar V. K. Common potato scab. *Sel'skokhozyaystvennye vesti*. 2021;(2(125)):56–57. (In Russ.).

10. Braun S., Gevens A., Charkowski A., Allen Ch., Jansky Sh. Potato Common Scab: a Review of the Causal Pathogens, Management Practices, Varietal Resistance Screening Methods, and Host Resistance. *American Journal of Potato Research*. 2017;94(1):283–296. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12230-017-9575-3>

11. Corrêa D. B. A., Amaral D. T., Silva M. J., Destéfano S. A. L. *Streptomyces* Brasiliscabiei, a New Species Causing Potato Scab in South Brazil. *Antonie van Leeuwenhoek*. 2021;114(7):913–931.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s10482-021-01566-y>

12. Belov D. A., Khyutti A. V. Modern phytopathogenic complex of potato diseases and measures to prevent their spread in Russia. *Kartofel' i ovoshchi* = Potato and Vegetables. 2022;(5):18–24. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.25630/PAV.2022.52.94.003>

13. Shpanev A. M., Smuk V. V., Fesenko M. A. Phytosanitary effect of mineral fertilizers on the potato plantations in the North-West region. *Agrokhimiya*. 2017;(12):38–45. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.7868/S0002188117120067>

14. Smuk V. V. Influence of long-term use of mineral fertilizers on lesion of potato tubers with rhizoctoniosis under conditions of the north-west of Russia. *Agrokhimicheskiiy vestnik* = Agrochemical Herald. 2023;(4):16–21. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2023-4-003>

15. Belov G. L., Zeyruk V. N., Vasilyeva S. V., Derevyagina M. K., Shabanov A. E., Kiselev A. I. The incidence of rhizoctoniosis on different potato varieties in the central region of Russia. *Agrokhimicheskiy vestnik* = Agrochemical Herald. 2019;(3):65–67. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2516-2019-10045>
16. Cheremisin A. I. Yakimova I. A., Elina A. M. The effect of weather conditions on potato variety resistance to fungal diseases in seed nurseries. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2020;(12(194)):10–17. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44394255>
17. Vladimirov V. P., Sharapova A. R., Mostyakova A. A., Sitnikova N. V. The influence of the timing of removal of tops on the yield and quality of potato tubers in the conditions of the forest-steppe of the Middle Volga region. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of the Kazan State Agrarian University. 2022;17(1(65)):5–8. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2022-5-8>
18. Lapshinov N. A., Ryabtseva T. V. Influence of the periods of the removal of vegetable tops on quality and productivity of the seed potatoes. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2012;(1):19–20. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17666171>
19. Shanin A. A. The effect of harvesting time on the economic and biological characteristics of early-ripening potato varieties. *Agrarnyy vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals. 2007;(4(40)):44–45. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9925830>
20. Kushnarev A. G., Kalashnikov M. V. Dynamics of yield accumulation of early potatoes in the steppe zone of Buryatia. *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii im. V. R. Filippova* = Bulletin of Buryat State Academy of Agriculture. 2017;(4(49)):129–134. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30763741>

Сведения об авторе

✉ **Смук Василий Васильевич**, кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник лаборатории опытного дела, ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», Гражданский проспект, д. 14, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 195220, e-mail: office@agrophys.ru; научный сотрудник лаборатории интегрированной защиты растений, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений», шоссе Подбельского, д. 3, г. Санкт-Петербург, Пушкин, Российская Федерация, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4763-9082>, e-mail: vvsmuk@mail.ru

Information about the author

✉ **Vasiliy V. Smuk**, PhD in Agricultural Science, senior researcher, the Laboratory of Experimental Work, Agrophysical Research Institute, Grazhdansky pr., 14, Saint-Petersburg, Russian Federation, 195220, e-mail: office@agrophys.ru; researcher, the Laboratory of Integrated Plant Protection, All-Russian Institute of Plant Protection, Podbelskogo, 3, Saint-Petersburg, Pushkin, Russian Federation, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4763-9082>, e-mail: vvsmuk@mail.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

ХРАНЕНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ / STORAGE AND PROCESSING OF AGRICULTURAL PRODUCTION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.816-826>
УДК 664.3.033



Моделирование процесса экстрагирования масла из продуктов переработки облепихи

© 2025. Д. Ф. Зиятдинова, Р. Г. Сафин, Е. Н. Соловьева ✉

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация

В работе представлены результаты переработки плодовой части облепихи, на первом этапе которой извлекали водорастворимые компоненты ягоды (сок), на втором – жирорастворимые компоненты (масло). Рассмотрены два последовательных способа извлечения масла из плодовой части облепихи: прессование и экстракция сырья. Прессованием получены масла холодного отжима из мякоти и семян, отпрессованные пластины жмыха мякоти и семян. Проведено извлечение остаточного масла из отпрессованных пластин экстрагированием гексаном. В процессе экстрагирования получены кинетические зависимости концентрации облепихового масла в жмыхе мякоти и семян. По аналогии с методом регулярного режима для исследования тепловых процессов предложен метод определения коэффициента массопроводности, который апробирован математическим и физическим моделированием. Методом темпа регулярного режима массопереноса из кинетических зависимостей концентрации облепихового масла в жмыхе определены коэффициенты массопроводности: при экстрагировании гексаном отпрессованных пластин жмыха мякоти $-1,09 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ и жмыха семян $-5,65 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$. Наибольшее значение коэффициента массопроводности получили в жмыхе мякоти облепихи, характеризующейся высокой пористостью. Результаты математического моделирования получены с использованием языковой среды программирования Python. Определены расчетные значения кинетических кривых концентрации облепихового масла в жмыхе. Решением дифференциальных уравнений теплообмена при заданных граничных условиях построены динамические кривые. Статистическая обработка результатов моделирования с применением критерия Фишера показала адекватность математической модели процесса экстрагирования облепихового масла из продуктов переработки облепихи. Полученные данные могут быть использованы для последующего математического моделирования и оптимизации режимных параметров процесса экстракции плодовой части облепихи.

Ключевые слова: коэффициент массопроводности, облепиховое масло, экстракция

Благодарность: 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: Зиятдинова Д. Ф., Сафин Р. Г., Соловьева Е. Н. Моделирование процесса экстрагирования масла из продуктов переработки облепихи. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(4):816–826.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.816-826>

Поступила: 29.11.2024

Принята к публикации: 31.07.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

Modeling of oil extraction process from sea buckthorn products

© 2025. Dilyara F. Ziatdinova, Rushan G. Safin, Elena N. Soloveva ✉

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

The paper presents the results of sea buckthorn fruit processing, at the first stage of which there have been extracted water-soluble components of the berry (juice), at the second stage – fat-soluble components (oil). Two successive methods of oil extraction from the fruit part of sea buckthorn are considered: pressing and extraction of raw materials. Cold-pressed oils from flesh and seeds and pressed plates of flesh and seed pulp were obtained by pressing. Extraction of residual oil from the pressed plates was carried out by extraction with hexane. In the process of extraction kinetic dependences of sea buckthorn oil concentration in flesh and seed pulp were obtained. By analogy with the method of regular mode for the study of thermal processes, a method of determining the mass-conductivity coefficient was proposed, which was tested by mathematical and physical modeling. The mass conductivity coefficients were determined from the kinetic dependences of sea buckthorn oil concentration in pulp by the method of regular mass transfer rate: at extraction of pressed pulp plates with hexane $-1.09 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ and seed pulp $-5.65 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$. The highest value of the mass conductivity coefficient is observed in the flesh pulp of sea

buckthorn, characterized by high porosity. The results of mathematical modeling were obtained using the Python programming language environment. The calculated values of kinetic curves of sea buckthorn oil concentration in the pulp were determined. By solving the differential equations of heat and mass transfer under the given boundary conditions, dynamic curves were constructed. Statistical processing of modelling results using Fisher's criterion testified the adequacy of the mathematical model of the process of sea buckthorn oil extraction from sea buckthorn products. The obtained data can be used for further mathematical modeling and optimization of regime parameters of the extraction process of sea buckthorn fruit part.

Keywords: mass conductivity coefficient; sea buckthorn oil; extraction

Acknowledgments: the work was done without financial support in the framework of the initiative topics. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

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

For Citation: Ziatdinova D. F., Safin R. G., Soloveva E. N. Modeling of oil extraction process from sea buckthorn products. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):816–826. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.816-826>

Received: 29.11.2024

Accepted for publication: 31.07.2025

Published online: 29.08.2025

Облепиха представляет особый интерес для научных исследований благодаря высокому содержанию ценных масел, витаминов и микроэлементов. Это обуславливает её широкое применение в производстве лекарственных средств, функциональных продуктов питания и косметики. В облепиховом масле, которое является наиболее ценным продуктом переработки облепихи, содержится токоферол (витамин Е), триацилглицерины с насыщенными и ненасыщенными жирными кислотами, среди последних преобладают мононенасыщенные (пальмитоолеиновая, олеиновая) кислоты [1, 2].

На первом этапе переработки облепихи проводят извлечение водорастворимых компонентов ягоды (сока), при этом в жоме остаются жирорастворимые компоненты, которые можно извлечь с помощью механического отжима и твердожидкостной экстракцией¹ [1, 2, 3].

Облепиховое масло получают несколькими технологическими способами: прессованием; диффузией; экстракцией. На практике, в основном, используют комбинацию из нескольких методов. В качестве сырья применяют свежие, замороженные, сухие плоды, семена, сухой жом с семенами, сухой жом без семян [4].

Получение облепихового масла прессованием позволяет получить натуральный продукт с физико-химическими и биохимическими характеристиками, свойственными композиции липидов и липидорастворимых веществ, содержащихся в плодовой мякоти и семенах облепихи.

Известен способ получения облепихового масла прессованием, где сок выделяют под вакуумом при температуре не более 70 °С до

полного удаления влаги. Сухой жом подают в пресс, где под давлением 5–10 атм. из него выделяют масло, выход которого составляет 85 %, кислотное число не превышает 5 мг КОН [5].

Известен способ получения натурального масла из семян облепихи, предложенный Ю. М. Нижегородцевым [6]. Данный способ отличается тем, что в результате комплексной переработки облепихи из ее плодов извлекаются семена, которые затем промываются, высушиваются, измельчаются и подвергаются холодному прессованию. Полученное облепиховое масло очищается путем фильтрования и расфасовывается в желатиновые капсулы или флаконы. Выход масла составляет до 12 %.

В работе [7] рассмотрен диффузионный способ получения облепихового масла из сухого жома растительным маслом в диффузионных батареях в режиме противотока. Способ позволяет получать масло с концентрацией 90 %, близкой по своим константам и фармакологическим свойствам к натуральному облепиховому маслу.

В работе [8] предложен способ получения облепихового масла, осуществляемый диффузионным методом с использованием в качестве растворителя растительного масла. Сырье экстрагируют растительным маслом с последующим отделением жидкой фракции прессованием. Выход масла из верхнего слоя мякоти – 90 %.

Экстракционный метод с использованием низкокипящих неполярных растворителей, которые с помощью современной аппаратуры могут быть полностью удалены из продукта – единственный метод, гарантирующий полное извлечение масла из растительного сырья.

¹Малахова Т. В. Комплексная переработка плодов облепихи. Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: мат-лы VIII Всерос. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов и конкурса по программе «Умник». Екатеринбург: УГЛУТУ, 2012. Ч. 2. С. 249–251.

URL: <https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/569/2/Malahova.pdf>

В литературе [9] есть информация, что наличие в экстрагируемом материале измельченных семян негативно влияет на качественные показатели вырабатываемого масла. Вследствие достаточно активной ферментной системы семян, в частности липазы, увеличивается кислотное число получаемого продукта. Поэтому экстракционное масло рекомендуется получать из плодовой мякоти и семян отдельно.

В работе [10] предложена технология получения облепихового масла, основанная на раздельной экстракции компонентов плодов облепихи – мякоти и семян – экстракционным бензином. Полученные экстракты купажируются в соответствии с содержанием каротиноидов. Выход масла из мякоти – 1,55 %, из семян – 0,36 %.

Известен способ переработки облепихи с получением масла [11], который заключается в экстрагировании облепихового масла из жома малополярным растворителем в присутствии многофункциональных кинетических полимерных катионов в натриевой форме. Выход масла по данному способу – 20 %.

Процессы твердожидкостной экстракции целевых компонентов из растительного сырья играют важную роль в переработке сельскохозяйственных продуктов, пищевой и фармацевтической промышленности и применяются после извлечения масла холодного отжима. Это обуславливает проведение многочисленных научных исследований, посвященных кинетике процесса диффузии, выходу продуктов экстракции, аппаратурному оформлению процесса [12, 13, 14, 15].

Для расчета кинетики массообменных процессов в системах с твердой фазой (экстрагирование, сушка) необходимы данные по коэффициенту массопроводности, который является основным кинетическим параметром экстракции из растительного сырья и количественно представляет все физические и физико-химические процессы в твердой фазе. Его значение зависит от экстрагируемого материала, физических свойств, концентрации и температуры. Для установок по переработке растительного сырья требуются соответствующие конструкции, учитывающие физические характеристики сырья. Коэффициент массопроводности является важной характеристикой для прогнозирования процессов массообмена и необходим при проектировании массообменного оборудования. Изучением этого вопроса

занимались С. П. Рудобашта [16], А. А. Атаманов [17], Н. А. Макаревич [18], Т. С. Камалиев [19] и т. д., в ходе их работ были определены коэффициенты массопроводности для разных видов растительного сырья при различных режимах. На данном этапе развития научных исследований не проработан вопрос расчета коэффициента массопроводности применительно к облепихе.

Цель работы – моделирование процесса комплексного извлечения облепихового масла из выжимок облепихи и определение коэффициента массопроводности.

Научная новизна – определение коэффициента массопроводности облепихового сырья при экстрагировании гексаном по аналогии с методом регулярного теплового режима для прогнозирования оптимальных режимных параметров работы экстракционных установок.

Материал и методы. В качестве объекта исследования для эксперимента использовали свежие ягоды облепихи сорта Великан.

Промытые плоды облепихи измельчали с сохранением целостности семян в колбе с лопастной мешалкой. Далее измельченную массу сепарировали на сок и плодовую мякоть путем фильтрации через отверстия диаметром $0,4 \div 0,6$ мм. Отделенную плодовую мякоть промывали дистиллированной водой и отжимали с целью удаления оставшихся сахаров и сока. После процесса отжима плодовую мякоть сушили в конвективной сушилке кипящего слоя при температуре 90°C в течение 30 минут, затем – при 60°C до остаточной влажности 4 %. По мере высыхания компоненты плодовой мякоти теряют удельный вес, далее их пневмотранспортируют из конвективной сушилки отработанным теплоносителем в воздушный сепаратор, при этом происходит отделение жома мякоти от семян облепихи [20]. Отделенные семена и жом мякоти подвергали холодному прессованию на гидропрессе при давлении 700 атм. для выделения масла холодного отжима. В результате холодного прессования получают: масло и пластины отпрессованного сырья из семян и жома мякоти.

Остаточное масло из отпрессованных пластин жома мякоти и жома семян извлекали методом твердожидкостной экстракции при 70°C . В качестве экстрагента использовали гексан.

Математическое описание нестационарного процесса экстракции масла из отпрессованных пластин орошением свежим экстра-

гентом можно записать дифференциальным уравнением Фика для бесконечной пластины²:

$$\frac{\partial C_w}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 C_w}{\partial x^2} \quad (1)$$

при краевых условиях:

$$C_w(x, 0) = C_{wn}, \quad (2)$$

$$C_w(0, \tau) = 0, \quad (3)$$

где C_w – концентрация целевого компонента в отпрессованных пластинах, %; a_m – коэффициент массопроводности сырья, являющийся коэффициентом внутренней диффузии, м²/с; x – текущая координата частицы, м; τ – текущее время, с.

Начальную концентрацию C_{wn} определяли в результате исчерпывающей экстракции с помощью аппарата Сокслета.

Кинетические зависимости средней концентрации облепихового масла в экстрагируемом сырье находят косвенным путем – определением масла, переходящего из растительного сырья в экстракт. Поэтому вначале строится кинетическая зависимость концентрации масла в экстракте путем периодического отбора проб и удаления из этих проб экстрагента выпариванием и сушкой.

Из кинетической зависимости средней концентрации масла в растительном сырье методом регулярного режима [16, 22, 23, 24], по аналогии с методом регулярного теплового режима, можно рассчитать коэффициент массопроводности по выражению:

$$a_m = Km. \quad (4)$$

Коэффициент формы тела K для одномерной частицы пластины определяли по соотношению:

$$K = \frac{a^2}{\pi^2}, \quad \text{где } a – \text{размер частицы, м.}$$

Для расчета темпа регулярного режима массопереноса m пластины сырья погружали в растворитель, воздействуя на них заданной температурой, и определяли изменение с течением времени массы растворителя. По результатам эксперимента строили зависимость натурального логарифма относительной избыточной массы (разности максимальной массы растворителя после процесса экстракции и массы в текущий момент времени, отчитываемой от начала погружения сырья в экстрагент) от

времени. На полученной зависимости выделяли стадию регулярного режима массопереноса, характеризующую тем, что опытные точки на графике группируются около прямой линии. Тангенс угла наклона этой прямой к оси абсцисс на графике численно равен значению темпа регулярного режима массопереноса. Далее по формуле (4) рассчитывали коэффициент массопроводности.

Решением дифференциального уравнения (1) совместно с краевыми условиями (2) и (3) в языковой среде программирования Python определяли динамические кривые локальной концентрации масла по сечению частицы растительного сырья:

$$C_w = f(x\tau). \quad (6)$$

Интегрированием зависимостей локальных концентраций масла по сечению в разные моменты времени по соотношению (7) можно получить расчетную кинетическую зависимость средней концентрации облепихового масла в растительном сырье:

$$\bar{C}_w(\tau) = \frac{1}{a} \int_0^a C_w(\tau) dx, \quad (7)$$

$$\bar{C}_w = f(\tau). \quad (8)$$

Для исследования процесса экстракции и проверки адекватности математической модели была разработана экспериментальная установка, работающая в вакуумно-импульсивном режиме, схема и внешний вид которой представлены на рисунке 1.

Для извлечения остаточного масла из сырья отпрессованные пластины жома мякоти и жома семян облепихи толщиной 1 мм загружают в камеру 1, экстрагент заливают в колбу 2 и буферную емкость – гидрозатвор 3. Температуру экстрагента поддерживают регулятором расхода хладагента 4, получающего информацию от датчика температуры 5. Перед проведением эксперимента из установки с помощью вакуумного насоса 6 удаляют воздух и закрывают клапан 7, давление в системе измеряют вакуумметром 8. Экстракцию ведут 40–80 минут при открытом вентиле 9 и закрытом вентиле 10. В процессе экстракции по мере заполнения буферной емкости 3 открывают вентиль 11 и экстракт частично переливают в колбу 2.

²Ак-сельруд Г. А., Лысянский В. М. Экстрагирование: Система твердое тело – жидкость. Л.: Химия: Ленинградское отделение, 1974. 19 с. URL: https://fileskachat.com/view/101323_74e370797a3c3e4f26f47383f2e1ec01.html

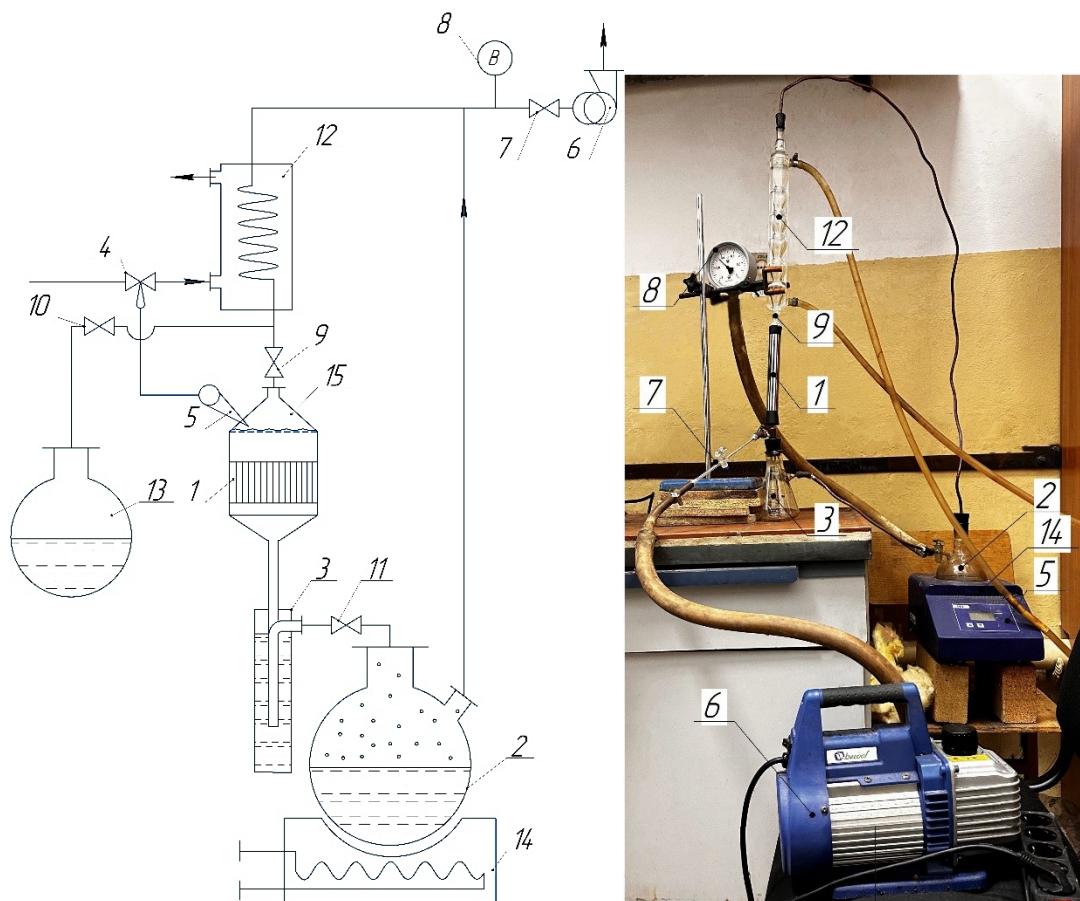


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – камера с растительным сырьем; 2 – колба с экстрактом; 3 – гидрозатвор; 4 – регулятор расхода хладагента; 5 – датчик температуры; 6 – вакуумный насос; 7 – клапан; 8 – вакуумметр; 9–11 – вентили; 12 – конденсатор; 13 – сборник экстрагента; 14 – колбонагреватель; 15 – распределитель экстрагента по сечению /

Fig. 1. Scheme of the experimental installation: 1 – chamber with raw material; 2 – flask with extract; 3 – hydraulic seal; 4 – refrigerant flow regulator; 5 – temperature sensor; 6 – vacuum pump; 7 – valve; 8 – vacuum gauge; 9–11 – valves; 12 – condenser; 13 – extractant collector; 14 – flask heater; 15 – extractant distributor

После процесса экстракции для выделения масла из экстракта проводили вакуумное выпаривание гексана и сушку облепихового масла путем открытия вентиля 9 и закрытия вентиля 8. Выпаривание ведут при остаточном давлении 5 кПа в течение 60 минут. Полученное экстракционное масло взвешивают. Все измерения проводили с помощью высокоточных аналитических весов СУ-64. Приведенные экспериментальные данные являются результатом обработки трех параллельных опытов.

Сопоставление расчетных в соответствии с выражением (8) и экспериментальных кинетических зависимостей средней концентрации масла в растительном сырье, а также сопоставление расчетного критерия Фишера с табличным значением при доверительной вероятности 95 % позволяет сделать вывод об адекватности математической модели.

Результаты и их обсуждение. В результате сепарации плодов облепихи на компоненты, в соответствии с приведенной методикой, из 1000 г плодов облепихи по результатам трех параллельных опытов получены: сок – 654,90 г; диффузионный сок – 297,03 г; высушенная плодовая мякоть – высушенный жом мякоти – 21,44 г; высушенные семена – 26,63 г. Исходное содержание масла в пластинах, определенное в аппарате Сокслета, соответствует 21,74 % – в мякоти, 5,12 % – в жоме семян.

В результате холодного прессования жома мякоти и семян получены масла холодного отжима, средние арифметические значения результатов трех измерений приведены в таблице 1.

Анализ данных таблицы 1 показывает, что выход масла из семян облепихи больше выхода масла из жома мякоти.

*Таблица 1 – Результаты холодного прессования жома мякоти и семян облепихи /
Table 1 – Results of cold pressing of flesh and seed pulp*

<i>Переработка растительного сырья / Processing of vegetable raw materials</i>	<i>Исходная масса, г / Initial weight, g</i>	<i>Масса масла холодного отжима, г (%) / Weight of cold pressed oil, g (%)</i>	<i>Масса отпрессованных пластин, г / Weight of pressed plates, g</i>
Жом мякоти / Flesh pulp	21,44	0,62 (2,88 %)	20,82
Семена / Seeds	26,63	2,03 (7,61 %)	24,60

На рисунке 2 приведены кинетические зависимости концентрации (C_D) облепихового масла в гексане при экстрагировании отпрессованных пластин жома мякоти и жома семян при температуре экстрагента, равной 70 °С.

Дисперсионный анализ кривой показывает, что через 50 минут экстрагирования отпрессованных пластин жома мякоти концентрация облепихового масла в экстракте во времени становится незначительной. При экстрагировании отпрессованных пластин жома семян

неизменность концентрации облепихового масла в экстракте отмечена через 70 минут.

Результаты исследований по содержанию масла в жоме мякоти и семенах даны в таблице 2. Анализ таблицы 2 показывает относительно небольшой выход масла холодного отжима из жома мякоти 2,88 % по сравнению с выходом масла из семян 7,61 %. Это связано с нахождением масла в жоме мякоти, в основном в межклеточном пространстве, и сложностью его удаления механическим отжимом.

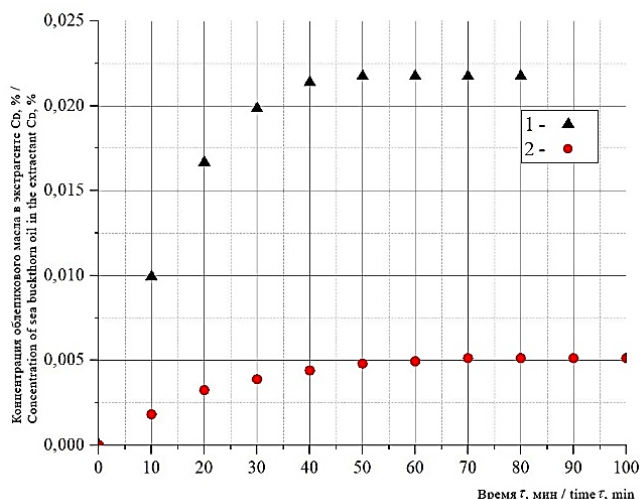


Рис. 2. Кинетическая зависимость концентрации (C_D) облепихового масла в экстракте при экстрагировании отпрессованных пластин жома: 1 – мякоти; 2 – семян /

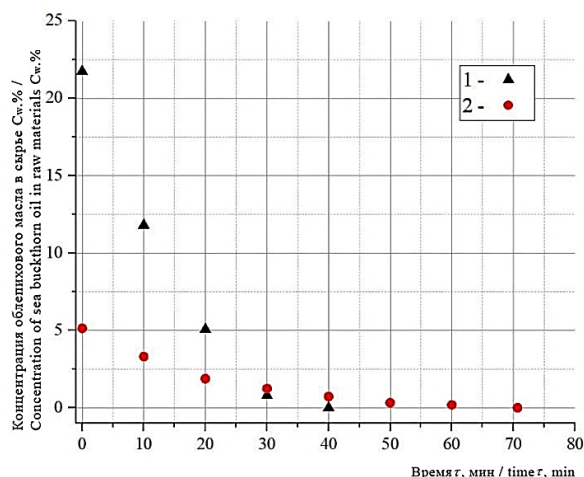
Fig. 2. Kinetic dependence of sea buckthorn oil concentration (C_D) in the extractant during extraction of pressed plates of pulp: 1 – flesh; 2 – seeds

*Таблица 2 – Начальная концентрация облепихового масла в сырье, % /
Table 2 – Initial concentration of sea buckthorn oil in the raw material, %*

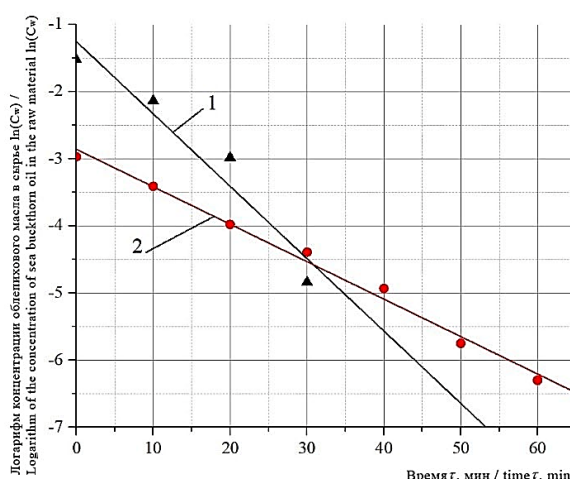
<i>Сырье / Raw materials</i>	<i>Масло холодного отжима / Cold-pressed oil</i>	<i>Масло экстракционное / Extraction oil</i>	<i>Исходная концентрация облепихового масла $C_{\text{вн}}$ / Initial concentration of sea buckthorn oil</i>
Мякоть / Flesh	2,88 (0,62 г)	21,74 (4,67 г)	24,62 (5,29 г)
Семена / Seeds	7,61 (2,03 г)	5,12 (1,36 г)	12,73 (3,39 г)
Всего (относительно массы плодов) / Total (relative to fruit weight)	0,265 (2,65 г)	0,603 (6,03 г)	0,868 (8,68 г)

На рисунке 3 представлены кинетические зависимости концентрации облепихового масла в декартовой и логарифмической системах координат в процессе экстракции облепихового

масла из отпрессованных пластин жома мякоти и жома семян, полученные обработкой экспериментальных данных трех параллельных измерений.



a / a



б / б

Рис. 3. Кинетические зависимости концентрации облепихового масла: *a* – в декартовой системе координат; *б* – логарифм концентрации; 1 – в жоме мякоти; 2 – в жоме семян /

Fig. 3. Kinetic dependences of sea buckthorn oil concentration in Cartesian and logarithmic coordinate systems: *a* – in Cartesian coordinate system; *b* – logarithm of concentration; 1 – in flesh pulp; 2 – in seed pulp

Коэффициент формы исследуемых частиц, рассчитанный по формуле (5), составил $K = 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$, темп регулярного режима m определяли как тангенс угла наклона кинетической зависимости натурального логарифма концентрации облепихового масла: для мякоти – $0,10779 \frac{1}{\text{с}}$, для семян – $0,05578 \frac{1}{\text{с}}$.

Коэффициента массопроводности a_m , рассчитанный по формуле (4), составил:

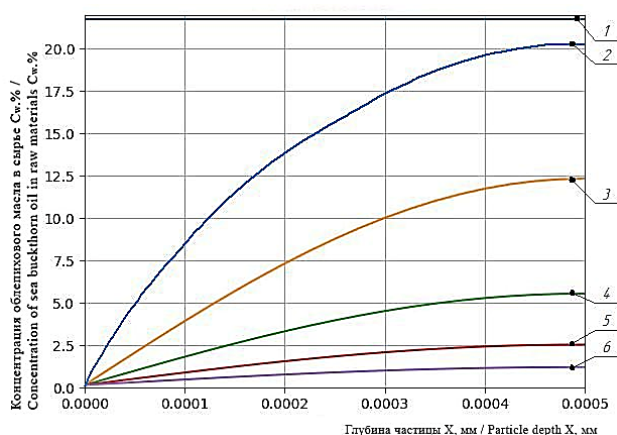
– при экстрагировании отпрессованных пластин жоме мякоти:

$$a_m = 1,09 \cdot 10^{-8}, \text{ м}^2/\text{с}; \quad (8)$$

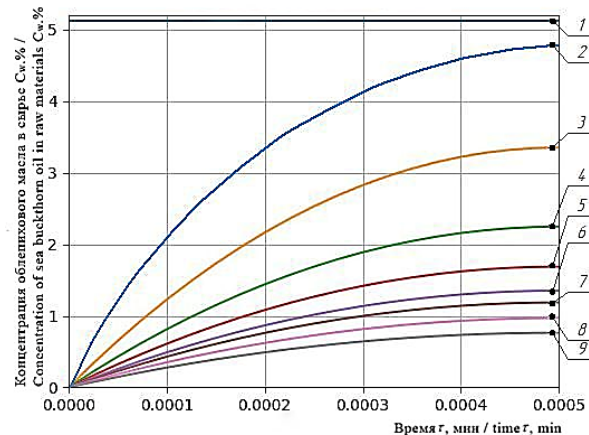
– при экстрагировании отпрессованных пластин жоме семян:

$$a_m = 5,65 \cdot 10^{-9}, \text{ м}^2/\text{с}. \quad (9)$$

Решением дифференциального уравнения (1) при граничных условиях (2), (3) и параметрах идентификации (8), (9) построены динамические кривые изменения локальных концентраций экстрактивных веществ по сечению пластины, толщиной 1 мм из жоме мякоти и семян (рис. 4).



a / a



б / б

Рис. 4. Расчетные динамические кривые концентрации облепихового масла (C_w) по сечению пластины жоме: *a* – мякоти; *б* – семян; 1 – $\tau = 0$ мин; 2 – $\tau = 1$ мин; 3 – $\tau = 10$ мин; 4 – $\tau = 20$ мин; 5 – $\tau = 30$ мин; 6 – $\tau = 40$ мин; 7 – $\tau = 50$ мин; 8 – $\tau = 60$ мин; 9 – $\tau = 70$ мин /

Fig. 4. Calculated dynamic curves of sea buckthorn oil concentration (C_w) in the section of the pulp plate: *a* – flesh; *b* – seeds; 1 – $\tau = 0$ min; 2 – $\tau = 1$ min; 3 – $\tau = 10$ min; 4 – $\tau = 20$ min; 5 – $\tau = 30$ min; 6 – $\tau = 40$ min; 7 – $\tau = 50$ min; 8 – $\tau = 60$ min; 9 – $\tau = 70$ min

Для проверки адекватности математического описания процесса экстракции реальной физической картине интегрированием динамических кривых по соотношению (7) получены расчетные кинетические зависимости средней концентрации. На рисунке 5 сопоставлены

результаты экспериментальных данных средней концентрации облепихового масла в мякоти и семенах (рис. 3) с расчетными значениями средней концентрации. Сплошными линиями показаны расчетные данные по соотношению (8), точками – экспериментальные данные.

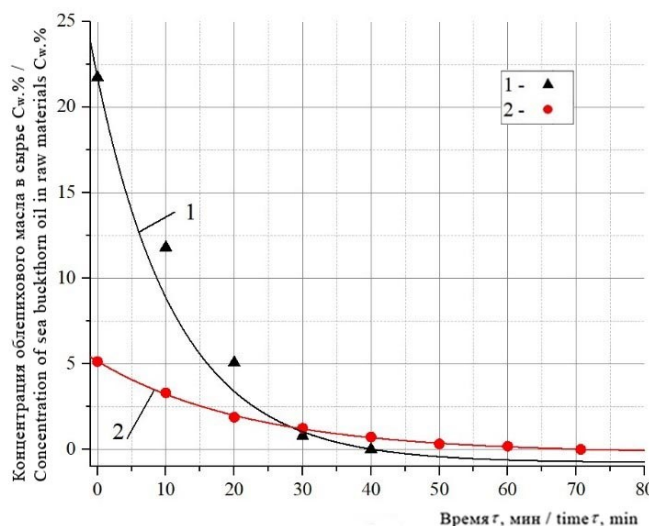


Рис. 5. Расчетные (сплошные линии) и экспериментальные (точки) кинетические кривые концентрации облепихового масла (C_w) в жоме: 1 – мякоти, 2 – семян /

Fig. 5. Calculated (solid lines) and experimental (points) kinetic curves of sea buckthorn oil concentration (C_w) in the pulp: 1 – flesh, 2 – seeds

Отклонение расчетных данных от экспериментальных не превышает 15 %. Статистическая обработка результатов исследований с применением критерия Фишера показала адекватность математической модели процесса экстрагирования облепихового масла из отпрессованных пластин жома мякоти ($F_{расч} = 2,1$; $F_{табл} = 4,07$) и семян ($F_{расч} = 2,6$; $F_{табл} = 4,6$) орошением свежим гексаном и возможности ее применения для расчетов перколяционных экстракторов.

Заключение. В результате сепарации плодов облепихи получены: концентрированный сок – 65,49 %; диффузионный сок – 29,70 %; масло холодного отжима – 0,265 %; масло экстракционное – 0,603 %. Выход масла холодного отжима относительно массы жома мякоти и массы семян соответственно 2,88 и 7,61 %. Относительно небольшой выход масла холодного отжима из жома мякоти по сравнению с выходом масла из семян связан с нахождением масла в жоме мякоти, в основном, в межклеточном пространстве и сложностью его удаления механическим отжимом. Определено количество остаточного масла в отпрессованных

пластинах относительно массы жома мякоти и массы семян соответственно 21,74 и 5,12 %.

По аналогии с известным методом [16, 21, 22, 23] предложен метод определения коэффициента массопроводности, который апробирован математическим и физическим моделированием.

Методом темпа регулярного режима массопереноса из кинетических зависимостей концентрации облепихового масла в жоме определены коэффициенты массопроводности: при экстрагировании гексаном отпрессованных пластин жома мякоти – $\alpha_m = 1,09 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ и жома семян – $\alpha_m = 5,65 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$.

Математическим моделированием процесса экстракции растительного сырья орошением свежим экстрагентом (гексаном) построены динамические и кинетические кривые удаления облепихового масла из отпрессованных пластин из жома мякоти и семян, полученного после удаления масла холодного отжима.

Результаты исследований позволят разработать технические решения, связанные с управлением технологическим процессом и прогнозированием оптимальных режимных параметров работы экстракционных установок.

Список литературы

1. Касьянов Г. И., Мустафаева К. К., Редько М. Г. Совершенствование технологии комплексной переработки плодов облепихи. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2014;(1):77–79. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21303228> EDN: RYEQNF

2. Мезенова О. Я., Мерзель Й. Т., Воронцов С. А., Воронцов П. А. Оценка биопотенциала дикорастущей облепихи и перспектив ее комплексного использования. Вестник Международной академии холода. 2020;(3):44–51. DOI: <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2020-19-3-44-51> EDN: LGSSZQ
3. Семин А. Н., Евтушенко Н. С., Карпукхин М. Ю., Кирсанов Ю. А., Зырянов С. Б. Способ переработки ягод облепихи: пат. № 2262864 Российская Федерация. № 2003114278/13: заявл. 14.05.2003; опубл. 27.10.2005. Бюл. 30. 8 с. Режим доступа: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
4. Vilas-Franquesa A., Juan B., Saldo J. Targeted analysis of sea buckthorn oil extracted by accelerated solvent extraction technique using green and conventional solvents. LWT. 2022;164:113643. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643822005783>
5. Мехтиев Н. Х., Азизов Ф. Ш., Саламов А. А. Способ получения масла и сока из ягод облепихи: авт. св-во №914619 Российская Федерация. №2851193/28-13: заявл. 25.02.1980; опубл. 25.03.1982. Бюл. № 11. Режим доступа: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
6. Нижегородцев Ю. М. Облепиховое масло: пат. № 2093174 Российская Федерация. № 96108335/14: заявл. 07.05.1996; опубл. 20.10.1997. 7 с. Режим доступа: https://patents.s3.yandex.net/RU2093174C1_19971020.pdf
7. Матафонов И. И. Облепиха: (Влияние на организм животного). Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1983. 165 с. Режим доступа: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001151566?ysclid=m41la5wd1w369977954>
8. Терещук Л. В., Павлов С. С. Способ производства облепихового масла: пат. № 2176268 Российская Федерация. № 99109366/13: заявл. 29.04.1999; опубл. 27.11.2001. Бюл. №33. 6 с. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37878937_40037667.pdf
9. Терещук Л. В., Котик О. А., Королькова Н. В., Гладнева А. А. Об изучении жирнокислотного состава облепихи. Вестник РАСХН. 2007;(4):94–95.
10. Михеев С. Г., Михеев А. Г. Способ получения масла и сока из ягод облепихи: пат. № 2144061 Российская Федерация. № 98110045/13: заявл. 27.05.1998; опубл. 10.01.2000. Бюл. №1. 6 с. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37845943_36493203.pdf
11. Светлов А. К., Виноградова Л. А., Сеит-Аблаева С. К., Цехина Н. Н., Орехова С. В., Пирогова Н. А., Хасьянова Н. Г. Способ получения облепихового масла из жома: пат. № 2021996 Российская Федерация. № 4933534/13: заявл. 29.03.1991; опубл. 30.10.1994. Режим доступа: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002021996_19941030_C1_RU/?ysclid=m413ey6rmf939468894
12. Сафина А. В., Ахметханова Е. Н., Сафин Р. Р., Исмаилов Л. Ю., Байгильдеева Е. И. Программное моделирование процесса экстракции ценных компонентов из растительного сырья. Деревообрабатывающая промышленность. 2022;(3):42–50.
13. Сафин Р. Г., Ахметханова Е. Н., Арсланова Г. Р., Сафина А. В., Зиятдинова Д. Ф., Валеев К. В. Обзор существующих способов получения ценных компонентов из облепихи крушиновидной и разработка комплексной схемы ее переработки. Деревообрабатывающая промышленность. 2022;(2):70–82.
14. Сафин Р. Г., Ахметханова Е. Н., Сафина А. В., Зиятдинова Д. Ф., Тимербаева А. Р., Валеев К. В. Обзор исследований по производству облепихового сока. Системы. Методы. Технологии. 2022;(3(55)):116–122. DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-3-116-122> EDN: JWSVJ
15. Сафин Р. Г., Соловьева Е. Н. Комплексная переработка облепихи. Казань: ООО «Редакционно-издательский центр «Школа», 2023. 87 с.
16. Тепляков Ю. А., Рудобашта С. П., Нечаев В. М., Климов А. М. Расчет кинетики процессов экстрагирования из твердых материалов с различной структурой. Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2009;15(3):553–560. Режим доступа: http://vestnik.tstu.ru/rus/t_15/pdf/15_3_011.pdf
17. Агаманов А. А., Фролов И. А. Исследование различных вариантов извлечения биологически активных веществ из плодов *Sorbus Aucuparia*. Решетневские чтения: мат-лы XXIV Международ. научн.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева: в 2 частях, Красноярск, 10–13 ноября 2020 года. Т. Часть 2. Красноярск: ФГБОУ ВО Сибирский ГУ науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, 2020. С. 85–86. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=rscuch> EDN: RSCUCH
18. Макаревич Н. А., Богданович Н. И., Третьяков С. И., Коптелова Е. Н., Кутакова Н. А. Кинетическая модель извлечения экстрактивных веществ из растительного сырья. Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. 2014;(2):98–107. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23685799> EDN: TYIFQR
19. Камалиев Т. С., Елизаров Д. В., Елизаров В. В. Кинетика массопереноса в пограничном слое на внутренней поверхности капли в процессе жидкостной экстракции. Вестник Казанского технологического университета. 2013;16(12):182–186. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19141310> EDN: QCWPMH
20. Сафин Р. Г., Ахметханова Е. Н., Родионов А. С., Зиятдинова Д. Ф., Сафина А. В., Хайруллин И. Ф. Способ отделения семян ягод от мякоти: пат. № 2797550 Российская Федерация. № 2022112081: заявл. 05.05.2022; опубл. 07.06.2023. Бюл. № 16. 9 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54055375>

21. Ковальногов В. Н., Карпухина Т. В., Федоров Р. В., Корныльев М. Г., Золотов А. Н. Способ определения коэффициента диффузии жидкости в капиллярно-пористом теле при воздействии ультразвуком: пат. № 2649082 Российская Федерация. № 2016150288: заявл. 20.12.2016; опубл. 29.03.2018. Бюл. № 10. 5 с. Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_38150526_44002358.PDF

22. Тепляков Ю. А., Рудобашта С. П., Нечаев В. М., Климов А. М. Кинетический расчет процесса экстрагирования для непористых гранулированных материалов. Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2009;15(2):330–336. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12228478> EDN: KHPMQT

23. Рудобашта С. П. Массопроводность при сушке строительных материалов. Умные композиты в строительстве. 2021;2(2):16–25. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46423345> EDN: IJYYPR

Reference

1. Kasyanov G. I., Mustafaeva K. K., Redko M. G. Improvement of complex processing technology of sea-buckthorn fruits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya* = *Izvestiya vuzov. Food Technology*. 2014;(1):77–79. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21303228>

2. Mezenova O. Ya., Mörzl Y. T., Vorontsov S. A., Vorontsov P. A. Assessment of the biopotential of wild buckthorn and prospects of its integrated use. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda* = *Journal International Academy of Refrigeration*. 2020;(3):44–51. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17586/1606-4313-2020-19-3-44-51>

3. Semin A. N., Evtushenko N. S., Karpukhin M. Yu., Kirsanov Yu. A., Zyryanov S. B. Sea buckthorn berry processing method: Patent RF, no. 2262864 2005. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet

4. Vilas-Franquesa A., Juan B., Saldo J. Targeted analysis of sea buckthorn oil extracted by accelerated solvent extraction technique using green and conventional solvents. *LWT*. 2022;164:113643. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643822005783>

5. Mekhtiev N. Kh., Azizov F. Sh., Salamov A. A. The method of obtaining oil and juice from sea buckthorn berries: Patent RF, no. 914619. 1982. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet

6. Nizhegorodtsev Yu. M. Sea buckthorn oil: Patent RF, no. 2093174, 1997. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2093174C1_19971020.pdf

7. Matafonov I. I. Sea buckthorn: (Effect on the animal's body). Novosibirsk: *Nauka: Sib. otd-nie*, 1983. 165 p. URL: <https://search.rsl.ru/record/01001151566?ysclid=m41la5wd1w369977954>

8. Tereshchuk L. V., Pavlov S. S. Sea buckthorn oil production method: Patent RF, no. 2176268. 2001. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37878937_40037667.pdf

9. Tereshchuk L. V., Kotik O. A., Korol'kova N. V., Gladneva A. A. On the study of fat acid composition in sea buckthorn. *Vestnik RASKhN*. 2007;(4):94–95. (In Russ.).

10. Mikheev S. G., Mikheev A. G. The method of obtaining oil and juice from sea buckthorn berries: Patent RF, no. 2144061, 2000. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37845943_36493203.pdf

11. Svetlov A. K., Vinogradova L. A., Seit-Ablaeva S. K., Tsekhina N. N., Orekhova S. V., Pirogova N. A., Khasyanova N. G. Method for producing sea buckthorn oil from pulp: Patent RF, no. 2021996. 1994. URL: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002021996_19941030_C1_RU/?ysclid=m413ey6rmf939468894

12. Safina A. V., Akhmetkhanova E. N., Safin R. R., Ismailov L. Yu., Baygildeeva E. I. Software modeling of the process of extraction of valuable components from plant raw materials. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* = *Woodworking industry*. 2022;(3):42–50. (In Russ.).

13. Safin R. G., Akhmetkhanova E. N., Arslanova G. R., Safina A. V., Ziatdinova D. F., Valeev K. V. Review of existing methods for obtaining valuable components from sea buckthorn and the development of a comprehensive scheme for its processing. *Derevoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* = *Woodworking industry*. 2022;(2):70–82. (In Russ.).

14. Safin R. G., Akhmetkhanova E. N., Safina A. V., Ziatdinova D. F., Timerbaeva A. R., Valeev K. V. Overview of research on sea buckthorn juice production. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = *Systems. Methods. Technologies*. 2022;(3(55)):116–122. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-3-116-122>

15. Safin R. G., Solovyeva E. N. Complex processing of sea buckthorn. Kazan: *ООО «Redaktsionno-izdatel'skiy tsentr «Shkola»*, 2023. 87 p.

16. Teplyakov Yu. A., Rudobashta S. P., Nechaev V. M., Klimov A. M. Calculation of extraction kinetics of solid materials with different structure. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Transactions of the TGTU*. 2009;15(3):553–560. (In Russ.). URL: http://vestnik.tstu.ru/rus/t_15/pdf/15_3_011.pdf

17. Atamanov A. A., Frolov I. A. Investigation of various options for extracting biologically active substances from *Sorbus Aucuparia* fruits. [Reshetnev Readings: Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conf., dedicated to the memory of the General Designer of Rocket and Space Systems, Academician M. F. Reshetnev: in 2 parts, Krasnoyarsk, November 10–13, 2020. Vol. Part 2. Krasnoyarsk: *FGBOU VO Sibirskiy GU nauki i tekhnologii imeni akademika M. F. Reshetneva*, 2020. pp. 85–86. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=rscuch>

18. Makarevich N. A., Bogdanovich N. I., Tretiakov S. I., Koptelova E. N., Kutakova N. A. Kinetic model for extraction of extractive substances from vegetable raw materials. *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya khimicheskikh nauk* = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series. 2014;(2):98–107. (In Belarus). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23685799>

19. Kamaliev T. S., Elizarov D. V., Elizarov V. V. Kinetics of mass transfer in the boundary location on the inner surface of droplets during liquid extraction. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2013;16(12):182–186. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19141310>

20. Safin R. G., Akhmetkhanova E. N., Rodionov A. S., Ziatdinova D. F., Safina A. V., Khayrullin I. F. The method of separating berry seeds from the pulp: Patent RF, no. 2797550. 2023. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54055375>

21. Kovalnogov V. N., Karpukhina T. V., Fedorov R. V., Kornylev M. G., Zolotov A. N. A method for determining the diffusion coefficient of a liquid in a capillary-porous body when exposed to ultrasound: Patent RF, no. 2649082. 2018. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_38150526_44002358.PDF

22. Teplyakov Yu. A., Rudobashta S. P., Nechaev V. M., Klimov A. M. Kinetic calculation of extraction process for porosity-free granular materials. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Transactions of the TGTU. 2009;15(2):330–336. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12228478>

23. Rudobashta S. P. Mass conductivity during drying of building materials. *Umnye kompozity v stroitel'stve* = Smart composite in construction. 2021;2(2):16–25. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46423345>

Сведения об авторах

Зиятдинова Диляра Фаритовна, доктор техн. наук, профессор кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», ул. Карла Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация, 420015, e-mail: office@kstu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2801-4642>

Сафин Рушан Гареевич, доктор техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», ул. Карла Маркса, 68, г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация, 420015, e-mail: office@kstu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5790-4532>

✉ **Соловьева Елена Ниязовна**, ассистент кафедры «Переработка древесных материалов», ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», ул. Карла Маркса, 68, г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация, 420015, e-mail: office@kstu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4794-9796>, e-mail: soloveva_elenaa@mail.ru

Information about the authors

Dilyara F. Ziatdinova, PhD in Engineering, professor at the Department of Wood Materials, Kazan National Research Technological University, st. Karl Marx, 68, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation, 420015, e-mail: office@kstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2801-4642>

Rushan G. Safin, PhD in Engineering, professor, Head of the Department of Wood Materials, Kazan National Research Technological University, st. Karl Marx, 68, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation, 420015, e-mail: office@kstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5790-4532>

✉ **Elena N. Soloveva**, teaching assistant, the Department of Wood Materials, Kazan National Research Technological University, st. Karl Marx, 68, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation, 420015, e-mail: office@kstu.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4794-9796>, e-mail: soloveva_elenaa@mail.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author



Оптимизация процесса ферментации крафтового пива посредством моделирования в системе Table Curve

© 2025. М. А. Шадрин¹, Н. В. Бураковская^{1✉}, Е. А. Молибога¹, Н. В. Щукина², М. И. Приставка¹

¹ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», г. Омск, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина», г. Омск, Российская Федерация

В рамках исследований проведен процесс оптимизации производства крафтового пива, установлены состав затора, доза внесения ферментного препарата, разработан подход к выбору оптимального соотношения технического компонента на основании полученных физико-математических показателей сусла. Оптимальные параметры анализируемого процесса производства крафтового пива определяли с использованием универсальной математической компьютерной системы Table Curve 3d.v4.0, которая строит трехфакторные математические модели, оценивает адекватность и значимость полученной модели, рассчитывает коэффициенты корреляции, детерминации модели, значение стандартной ошибки по имеющимся данным. На первом этапе обработки экспериментальных данных и разработки математических моделей выполнена проверка на достоверность различий между контрольными и опытными показателями. Определена принадлежность контрольных и опытных выборок к разным генеральным совокупностям. Достоверность различий между двумя выборками оценивали с помощью критерия Стьюдента. В качестве нулевой принималась гипотеза: различие между контрольными и опытными данными обусловлены случайностями выборки. Полученные результаты показали, что расчетное значение критерия Стьюдента в показателях больше табличного значения критерия, из чего следует, что принимается альтернативная гипотеза: различия в средних контрольных и опытных образцов значимы и не обусловлены случайными причинами, что позволяет сделать вывод – две выборки (контрольная и опытная) принадлежат двум разным генеральным совокупностям. С высоким уровнем достоверность различия объясняется внесением ферментного препарата Амиласубтилил в пивное сусло. В ходе экспериментальных исследований было установлено, что его применение позволяет повысить уровень ферментации, ускорить процесс брожения и улучшить качество пива, при этом снижая себестоимость итогового продукта. Все разработанные модели в программе Table Curve 3d.v4.0. отличались высоким уровнем адекватности, величина коэффициентов корреляции моделей составила не менее 0,99, а относительная погрешность математических моделей – не более 0,5 %.

Ключевые слова: прогнозирование, непромышленные рецептуры, композиция, пшеничное пиво

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: Шадрин М. А., Бураковская Н. В., Молибога Е. А., Щукина Н. В., Приставка М. И. Оптимизация процесса ферментации крафтового пива посредством моделирования в системе Table Curve. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(4):827–839. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.827-839>

Поступила: 13.06.2024

Принята к публикации: 04.08.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

Optimization of craft beer fermentation process by means of Table Curve system modeling

© 2025. Maxim A. Shadrin¹, Nina V. Burakovskaya^{1✉}, Elena A. Moliboga¹, Natalya V. Shchukina², Maria I. Pristavka¹

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

²Omsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin, Omsk, Russian Federation

Within the framework of the research the process of optimization of craft beer production was carried out, the composition of the mash, the dosage of enzyme preparation introduction were established, the approach to the selection of the optimal ratio of the technical component was developed on the basis of the obtained physical and mathematical parameters of the wort. The optimal parameters of the analyzed process of craft beer production were determined using the universal mathematical computer system Table Curve 3d.v4.0, which builds three-factor mathematical models, evaluates the adequacy and significance of the obtained model, calculates the correlation coefficients, model determination, the value of standard error on the available data. At the first stage of experimental data processing and development of mathematical models there was checked the reliability of differences between control and experimental indicators. The belonging of control and experimental samples to different general populations was determined. Reliability of differences between two samples was evaluated using Student's criterion. The following hypothesis was accepted as null hypothesis: the difference between control and experimental data is due to sampling randomness. The obtained results show that the calculated value of Student's criterion in the indicators is greater than the tabular value of the criterion, from which it follows that the

alternative hypothesis is accepted: the differences in the mean of control and experimental samples are significant and are not due to random causes, which makes it possible to conclude: the two samples (control and experimental) belong to two different general populations. The high level of reliability of the difference is explained by the introduction of the enzyme preparation Amylosubtilin into the beer wort. In the course of experimental studies it was found that the use of the enzyme preparation Amylosubtilin allows to increase the level of fermentation, accelerate the fermentation process and improve the quality of beer, while reducing the cost of the final product. All developed models were characterized by a high level of adequacy, the value of correlation coefficients of models was not less than 0.99, and the relative error of mathematical models was not more than 0.5 %, according to the results of the application of the program Table Curve 3d.v4.0.

Keywords: prediction, non-industrial formulations, composition, wheat beer

Acknowledgments: the work was done without financial support as part of an initiative topic.

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: Shadrin M. A., Burakovskaya N. V., Moliboga E. A., Shchukina N. V., Pristavka M. I. Optimization of craft beer fermentation process by means of Table Curve system modeling. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):827–839. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.827-839>

Received: 13.06.2024

Accepted for publication: 04.08.2025

Published online: 29.08.2025

Эффективным направлением совершенствования производственной деятельности пищевых предприятий является внедрение системных методов планирования и управления с использованием компьютерных технологий. В настоящее время использование цифровых систем для быстрых расчетов получило широкое распространение в различных сферах деятельности, в том числе и пищевой промышленности. Происходит цифровая трансформация бизнес-процессов, образования, науки и многого другого. Внедрение цифровых технологий в процессы производства и деятельности человека способствует их оптимизации и росту производительности. В научных исследованиях применение цифровых технологий ускоряет процесс обработки данных, совершенствует этапы построения математических моделей изучаемых процессов и явлений, что позволяет экономить время и прочие ресурсы при исследовании и анализе модели, нахождении прогнозных значений.

Планирование и управление производственными процессами является неотъемлемой частью современной пищевой промышленности [1]. Использование математических компьютерных систем позволяет быстро и точно определить оптимальные параметры анализируемого процесса производства пива и рекомендовать те параметры, которые позволяют получить наибольшую экономическую прибыль.

Выпуск алкогольной продукции имеет большое значение для экономики любой страны. Появление крафтовых пивоварен с собственными традициями вызвало новый виток развития отрасли. Пиво по-прежнему остается

самым популярным алкогольным напитком в мире [2, 3]. За последние 10 лет потребитель показал растущий интерес к ремесленному пиву [4, 5]. Крафтовое пиво не подвергается фильтрации и пастеризации, поэтому содержит в своем составе микроэлементы, витамины группы В, минеральные вещества [6, 7]. В данной работе авторами были рассмотрены вопросы, связанные с использованием ферментных препаратов (ФП), применение или варьирование различными факторами производственной цепочки, а также математическое моделирование процесса ферментации пивного сусла на основе цифровых технологий [8, 9, 10].

Цель исследования – поиск оптимальных моделей в системе Table Curve для производства крафтового пива с высоким качественным составом за счет варьирования переменных сырьевых и технически необходимых компонентов.

Научная новизна – впервые в технологии производства напитков использованы элементы цифровых технологий с учетом заданных физико-химических показателей качества крафтового пива с использованием ферментного препарата Амилоубтилин.

Материал и методы. В качестве контрольного образца исследуемого вида пива «Ароматное пшеничное» выбран следующий рецептурный состав: 70 % пшеничного солода; 30 % ячменного солода; без внесения ферментных препаратов (ФП).

Для приготовления крафтового пива использовали сырье: пшеничный и ячменный солод («Грейнрус Агро», Россия), соответствующий требованиям ГОСТ 29294-2021¹;

¹ГОСТ 29294-2021. Солод пивоваренный. Технические условия. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 26 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/76184/>

ферментный препарат Амилосубтилин (ООО «Концерн «Микробиопром», Россия); пивные дрожжи Lallemand-Voss Kveik (Lallemand, Австрия); хмель гранулированный тип 90 сортов Cascade и Citra (Beervindingem, США), соответствующий требованиям ГОСТ 32912-2014². Варьируемыми ингредиентами рецептуры являлись состав затора и доза вносимого ФП, остальные рецептурные ингредиенты – пивные дрожжи, хмель были идентичными.

Для определения основных физико-химических показателей готового продукта, а также для выявления наиболее оптимальных параметров производства использовали стандартные методы анализа. Активную кислотность определяли рН-метром с электродной системой PH 200E (Measurement, China) с диапазоном измерений от -2 до 18 ед. рН и пределом допускаемой основной абсолютной погрешности измерения не более 0,05 ед. рН. Динамическую вязкость определяли шариковым вискозиметром автоматизированным Lovis 2000 M/ME (Anton Paar GmbH, Австрия). Конечную степень сбраживания находили по величине истинного содержания экстракта, после удаления спирта и диоксида углерода пикнометрическим методом на пикнометре ПЖ2-1-КШ 5/13 (ООО «Мини-МедПром», Россия). Объемную долю спирта определяли с помощью дисцилляционного выделения этилового спирта и его улавливания при кипячении в дисцилляционной установке в соответствии с ГОСТ 12787-2021³ пикнометром ПЖ2-1-КШ 5/13 (ООО «МиниМедПром», Россия). Высоту пены и пеностойкость определяли по ГОСТ 30060-22⁴, для замера использовали стакан, линейку, секундомер.

Результаты и их обсуждение. По классической технологии крафтового пива под маркой «Ароматное пшеничное» основным сырьем является композиционные вариации пшеничного и ячменного солода. В опытных образцах в качестве технически необходимых компонентов, от качества и дозы внесения которых зависит органолептическая характеристика готового продукта, экономическая эффективность и продолжительность проведения технологического процесса, используются:

- пивные дрожжи Lallemand-Voss Kveik, которые ускоряют процесс ферментации с полным

снижением концентрации сусла в процессе брожения, стабилизируют вкусо-ароматический профиль во всем температурном диапазоне, придают нейтральный аромат с легкими фруктовыми нотами;

- ФП Амилосубтилин, который показал наилучшие результаты по разжижению затора, подготовке сырья к дальнейшему осахариванию за счет содержания катализатора гидролиза различных веществ в крахмалосодержащем сырье, а также широту действия в диапазоне: $+50 \div +75$ °C (оптимальная температура $+55 \div +58$ °C), рН 5,0–8,0. Преимуществом данного ФП является наличие в нем альфа-амилазы – быстрое снижение вязкости растворов крахмала, т. е. подготовка сусла к действию глюкоамилазы; гидролизует внутренние альфа-1,4-гликозидные связи крахмала, приводя к быстрому снижению вязкости клейстеризованных растворов крахмала и обеспечивая подготовку сусла к действию глюкоамилазы. Конечными продуктами действия ФП являются низкомолекулярные растворимые декстрины с небольшим содержанием моно- и дисахаридов (глюкозы и мальтозы). Применение ФП позволяет: повысить эффективность использования сырья за счет более глубокого гидролиза; сократить продолжительность брожения на 10–20 часов; стабилизировать технологический процесс; увеличить выход спирта на 1–4 %; повысить качество готовой продукции и культуру производства; обеспечить безопасную эксплуатацию оборудования.

Ферменты и ФП, используемые в комплексе с основным сырьем, могут быть получены из различных источников, включая растительные, животные и микробиологические [11, 12]. Они обладают различными свойствами и активностью, которые могут влиять на качество пива [13]. Поэтому объектом исследования является определение оптимального состава комплекса «состав затора / доза ФП» [14], который будет обладать наилучшими свойствами и давать эффективный результат при производстве крафтового пива [15].

В качестве опытных образцов служили 9 образцов, имеющих в составе затор (пшеничный солод, ячменный солод) и различные дозы ФП Амилосубтилин (табл. 1).

²ГОСТ 32912-2014. Хмелепродукты. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 16 с.

URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/58320/>

³ГОСТ 12787-2021 Продукция пивоваренная. Методы определения объемной доли этилового спирта, массовой доли действительного экстракта и расчет экстрактивности начального сусла. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 27 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/76856/>

⁴ГОСТ 30060-22 Пивоваренная продукция. Методы определения органолептических показателей и объема продукции. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 5 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/78905/>

Таблица 1 – Варианты заторов пива «Ароматное пшеничное» /
Table 1 – Mash variants of “Aromatnoe pshenichnoe” beer

№ опыта / No. of the experiment	Состав затора (солод), % / Mash composition (malt), %		Доза ФП Амилосубтилин, мг/кг / Dose of enzyme preparation Amylosubtilin, mg/kg
	пшеничный / wheat	ячменный / barley	
Контроль / Control	70	30	0
1	60	40	0,08
2	60	40	0,12
3	60	40	0,16
4	50	50	0,08
5	50	50	0,12
6	50	50	0,16
7	40	60	0,08
8	40	60	0,12
9	40	60	0,16

В качестве измеряемых показателей выступали: содержание сухих веществ (СВ); величина динамической вязкости (ДВ); время осахаривания (Ос); конечная степень сбраживания (КСС); активная кислотность (рН).

Исследования проводили для определения качественных характеристик пива, произведенного с использованием различных составов комплекса «состав затора / доза ФП».

Приготовление пивного сусла в лабораторных условиях позволяет более детально проанализировать технологический процесс производства, контролировать качество сусла и улучшать его характеристики [16, 17, 18]. Основными этапами приготовления пивного сусла являются: выбор сырья (использование солода из зерен ячменя, которые проращиваются, сушатся и обжариваются); подготовка инструментов и оборудования; затор; измерение плотности; брожение; отделение от осадка; анализ характеристик пивного сусла. Результаты исследований представлены в таблице 2.

На следующем этапе исследований были изучены показатели в готовом пиве «Ароматное пшеничное» с разным составом затора и дозами ФП Амилосубтилин (табл. 3).

На первом этапе обработки экспериментальных данных и разработки математических моделей выполняли проверку на достоверность различий между контрольными и опытными показателями: определение принадлежности контрольных и опытных выборок к генеральным совокупностям.

Для определения достоверности отличий использовали критерий Стьюдента. Рассмотрим применение критерия для физических показателей таблицы 2, расчетное значение находим по формуле:

$$t_{\text{расч.}} = \frac{M_2 - M_1}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}},$$

где M_1 и M_2 – значения средних арифметических сравниваемых выборок; m_1 и m_2 – значения статистических ошибок средних арифметических, табличное значение определяем при числе степеней свободы, равной 16 и доверительной вероятности 0,95, $t_{\text{табл.}}(0,05; 16) = 2,12$. Результаты сравнения показателей представлены в таблице 4.

По результатам вычислений при $t_{\text{расч.}} > t_{\text{табл.}}$ получаем статистически достоверную значимость отличий данных между образцами.

С помощью критерия Стьюдента определены равны ли средние значения контрольной и экспериментальной выборок. В качестве нулевой принималась гипотеза H_0 : генеральные средние значения равны, альтернативная гипотеза H_1 : генеральные средние значения различны.

Пользуясь данными таблицы 2, для показателя «массовая доля СВ в заторе» определим числовые характеристики, необходимые для нахождения расчетного значения критерия Стьюдента:

$$\bar{X} = 16,0, \bar{Y} = 16,8, S_x^2 = 0,36, S_y^2 = 0,127.$$

Таблица 2 – Влияние дозы ФП Амилоубтилин на показатели качества пивного сусла /
Table 2 – Effect of Amylosubtilin enzyme preparation dose on beer wort quality parameters

Показатель / Indicator	№ опыта / No. of the experiment									
	контроль / control	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Массовая доля СВ в заторе, % / Mass fraction of dry substances in the mash, %	16,0±0,2	16,5±0,2	16,7±0,2	16,9±0,2	16,8±0,2	16,9±0,2	16,0±0,2	17,0±0,2	17,1±0,2	17,3±0,2
Время Ос, мин / Saccharification time, min	60,0±0,2	59,0±0,2	58,0±0,2	56,0±0,2	58,0±0,2	56,0±0,2	54,0±0,2	57,0±0,2	54,0±0,2	52,0±0,2
ДВ, мПа*с / Dynamic viscosity, MPa*s	1,6±0,2	1,5±0,2	1,5±0,2	1,5±0,2	1,4±0,2	1,5±0,2	1,6±0,2	1,4±0,2	1,4±0,2	1,4±0,2
КСС, % / The final degree of attenuation, %	75,0±0,2	74,0±0,2	74,2±0,2	74,8±0,2	73,2±0,2	73,4±0,2	73,8±0,2	72,0±0,2	72,4±0,2	72,8±0,2
Активная кислотность, pH / Active acidity, pH	5,8±0,01	5,7±0,01	5,7±0,01	5,8±0,01	5,7±0,01	5,8±0,01	5,8±0,01	5,6±0,01	5,70±0,01	5,7±0,01

Таблица 3 – Влияние дозы ФП Амилоубтилин на показатели качества готового пива /
Table 3 – Effect of the dose of the enzyme preparation Amylosubtilin on the quality indicators of finished beer

Показатель / Indicator	№ опыта / No. of the experiment									
	контроль / control	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Массовая доля СВ в сусле, % / Mass fraction of dry substances in wort, %	13,0±0,2	12,0±0,2	11,2±0,2	10,8±0,2	10,9±0,2	10,9±0,2	10,7±0,2	10,8±0,2	10,8±0,2	10,7±0,2
Объемная доля спирта, % / Volume fraction of alcohol, %	4,5±0,2	4,32±0,2	4,0±0,2	3,77±0,2	4,01±0,2	3,99±0,2	3,88±0,2	4,18±0,2	4,18±0,2	3,88±0,2
Высота пены, мм / Foam height, mm	40,0±0,2	39,0±0,2	38,0±0,2	38,0±0,2	38,0±0,2	39,0±0,2	37,0±0,2	35,0±0,2	39,0±0,2	40,0±0,2
Пеностойкость, мин / Foam resistance, min	3,8±0,2	3,5±0,2	3,9±0,2	3,9±0,2	3,9±0,2	3,5±0,2	4,0±0,2	4,1±0,2	3,5±0,2	3,8±0,2
Активная кислотность, pH / Active acidity, pH	4,7±0,01	4,5±0,01	4,7±0,01	4,8±0,01	4,5±0,01	4,7±0,01	4,8±0,01	4,7±0,01	4,8±0,01	4,5±0,01

Таблица 4 – Оценка достоверности различий между среднестатистическими данными в контрольных и опытных образцах / Table 4 – Assessment of reliability of differences between arithmetic mean data in control and experimental samples

Показатель / Indicator	Образцы / Samples		Критерий Стьюдента (вероятность прогноза 95 %, уровень значимости 0,05) / Student's criterion (prediction probability 95 %, significance level 0.05)		
	контроль / control	опыт / experiment	расчетное значение $t_{расч.}$ / estimated value $t_{calc.}$	табличное значение $t_{табл.}$ (0,05; 16) / tabular value $t_{tabl.}$ (0.05; 16)	достоверность различия / reliability of difference
Затоп / Beer mash					
СВ, % / Dry substances, %	16,0±0,2	16,8±0,2	2,83	2,12	Значимо / Significant
Время Ос, мин / Saccharification time, min	60,0±0,2	56,0±0,2	14,14	2,12	Значимо / Significant
Вязкость, мПа·с / Viscosity, MPa·s	1,60±0,02	1,47±0,02	4,71/0,46	2,12	Незначимо / Insignificant
КСС, % / The final degree of attenuation, %	75,0±0,2	73,4±0,2	5,66	2,12	Значимо / Significant
Активная кислотность, рН / Active acidity, pH	5,80±0,01	5,70±0,01	5,50/7,07	2,12	Значимо / Significant
Пивное сусло / Beer wort					
Массовая доля СВ, % / Mass fraction of dry substances, %	13,0±0,2	10,98±0,2	7,15	2,12	Значимо / Significant
Объемная доля спирта, % / Volume fraction of alcohol, %	4,5±0,02	4,02±0,2	16,85/2,4	2,12	Значимо / Significant
Высота пены, мм / Foam height, mm	40,0±0,2	38,11±0,2	6,68	2,12	Значимо / Significant
Пеностойкость, мин / Foam resistance, min	3,8±0,2	3,79±0,2	0,79/0,035	2,12	Незначимо / Insignificant
Активная кислотность, рН / Active acidity, pH	4,7±0,01	4,667±0,01	2,36/2,33	2,12	Значимо / Significant

Расчетное значение находили по формуле:

$$t_{расч.} = \frac{|\bar{X} - \bar{Y}|}{\sqrt{(n_x - 1)S_x^2 + (n_y - 1)S_y^2}} \sqrt{\frac{n_x n_y (n_x + n_y - 2)}{n_x + n_y}},$$

$$t_{расч.} = 3,44; \quad t_{табл.} (0,05; 16) = 2,12.$$

Поскольку $t_{расч.} > t_{табл.}$, отвергаем нулевую гипотезу, принимаем альтернативную.

В части научных исследований применяется «приближение» t-критерия:

$$t_{расч.} = \frac{|\bar{X} - \bar{Y}|}{\sqrt{n_x S_x^2 + n_y S_y^2}} \sqrt{n_x n_y}.$$

В ряде источников это «приближение» называют критерием Крамера-Уэлча. Заметим, что критические значения для критерия Крамера-Уэлча зависят только от уровня значимости α и выражаются через критические значения t-критерия Стьюдента следующим образом: $t_{крит} (0,01; \infty) = 2,58$; $t_{крит} (0,1; \infty) = 1,65$; $t_{крит} (0,05; \infty) = 1,96$ (табл. 5).

Таким образом доказано, что данные контрольного образца и опытных достоверно (значимо) отличаются друг от друга практически по всем показателям, кроме пеностойкости и активной кислотности готового пива за счет введения ФП Амилосубтилина. Использование методов исследования с программой Table Curve позволит более детально определить оптимальную дозу внесения препарата, а также представить детальные рекомендации производству.

На рисунках 1–5 приведены графические иллюстрации разработанных математических моделей, на которых: Y – доза ФП Амилосубтилин, мг/кг; X – доза ячменного солода, %; Z₂ – искомый показатель.

Современный процесс производства пива осуществляется зачастую ускоренным способом, т. е. используется всего одна пауза в процессе затирания солода, именно процесс осахаривания (Ос).

Таблица 5 – Критерий Крамера-Уэлча для показателей качества пивного сусла /
Table 5 – Cramer-Welch criterion for beer wort quality indicators

Показатель / Indicator	Критерий Стьюдента (вероятность прогноза 95 %, уровень значимости 0,05) / Student's criterion (prediction probability 95 %, significance level 0.05)		
	расчетное значение $t_{\text{расч.}}$ / calculated value $t_{\text{cal.}}$	табличное значение $t_{\text{крит}} (0,05; \infty)$ / tabular value $t_{\text{crit.}} (0,05; \infty)$	гипотеза принимаемая / hypothesis accepted
Затоп / Beer mash			
СВ, % / Dry substances, %	3,43912	1,96	Генеральные средние значения различны / The general averages are different
Время Ос, мин / Saccharification time, min	5,3505	1,96	
Вязкость, мПа·с / Viscosity, MPa·s	4,3603	1,96	
КСС, % / The final degree of attenuation, %	4,619	1,96	
Активная кислотность, pH / Active acidity, pH	2,636	1,96	
Пивное сусло / Beer wort			
Массовая доля СВ, % / Mass fraction of dry substances, %	8,4807	1,96	Генеральные средние значения различны / The general averages are different
Объемная доля спирта, % / Volume fraction of alcohol, %	8,2185	1,96	
Высота пены, мм / Foam height, mm	3,791	1,96	
Пеностойкость, мин / Foam resistance, min	0,04698	1,96	Генеральные средние значения равны / The general averages are equal
Активная кислотность, pH / Active acidity, pH	0,7707	1,96	

Данный процесс заключается в использовании гидролитических ферментов, которые содержатся в солоде и вспомогательных материалах, и доведение их до оптимальных показателей (температуры и значения pH). Эта процедура приводит к тому, что растворимые высокомолекулярные вещества разлагаются на малорастворимые полимеры. Оптимальный температурный оптимум для данного этапа составляет 61–72 °С, при этом происходят сразу две паузы, при которых работают различные ферменты и происходит разложение крахмала, белка, β -глюкана, фосфата, липидов, полифенолов.

Аппроксимированная поверхность отклика изменения времени Ос пивного сусла приведена на рисунке 1, осуществляется на 54–56 минуте (оптимум окрашен зеленым цветом). Заметим, что при отсутствии заявленного аппроксимирующего полинома система ведет расчет по всем функциям, имеющимся в базе данных программы. Наряду с подобранной математической моделью на рисунке указаны значения: r^2 – коэффициент детерминации; $DF Adj r^2$ – уровень доверительной вероятности; $FitStdErr$

– значение стандартной ошибки; статистические оценки параметров математической модели.

Важно отметить, что любой параметр модели можно при необходимости изменить, для этого выбирается другой аппроксимирующий полином, который исследуется и анализируется.

Данная математическая модель времени Ос, мин, представлена зависимостью следующего вида:

$$Z_2 = a + b \cdot e^{-X} + c \cdot Y^{2,5},$$

где: коэффициенты модели равны: $a = 59,401$;

$b = 2,114$; $c = -718,183$;

коэффициент детерминации: $R^2 = 0,998$;

относительная погрешность модели не превышает 0,24 %.

Адекватность модели проверяли, используя критерий Фишера, $F_{расч.} = 241,9939$ найдено с помощью Table Curve, $F_{табл.}(0,05;2;6) = 5,14$ при уровне значимости 5 %, т. е. с доверительной вероятностью 95 %, число степеней свободы $k_1 = 2$, поскольку модель содержит два фактора X, Y; $k_2 = 9 - 2 - 1 = 6$. Определили, что $F_{расч.} > F_{табл.}$, можно сделать вывод о том, что полученная модель статистически значима.

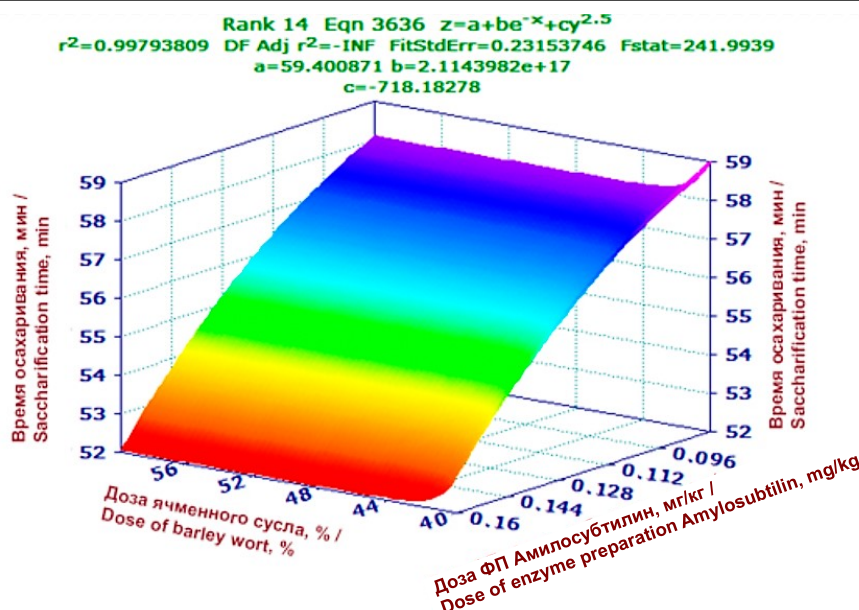


Рис. 1. Поверхность отклика изменения времени Ос /
 Fig. 1. The response surface of the saccharification time change

Поиск оптимального времени Ос достаточно важен и является основным элементом в части облегчения действия различных ФП в процессе растворения составных веществ. С помощью математического моделирования процесс Ос будет наиболее адекватным на 54–56 минуте при дозе внесения ферментного препарата в количестве 0,14 мг/кг от массы затора, композиция солода (пшеничного и ячменного) при данном результате составляет 50:50 соответственно.

Поверхность отклика изменения массовой доли СВ представлена на рисунке 2. Необходимость определения данного показателя спровоцировано тем, что количественное содержание СВ в сусле перед тем, как в него было направлено нужное количество дрожжей влияет на качество готового продукта. Микроорганизмы производят из данного сырья алкоголь и углекислый газ, являющиеся основой производства пива.

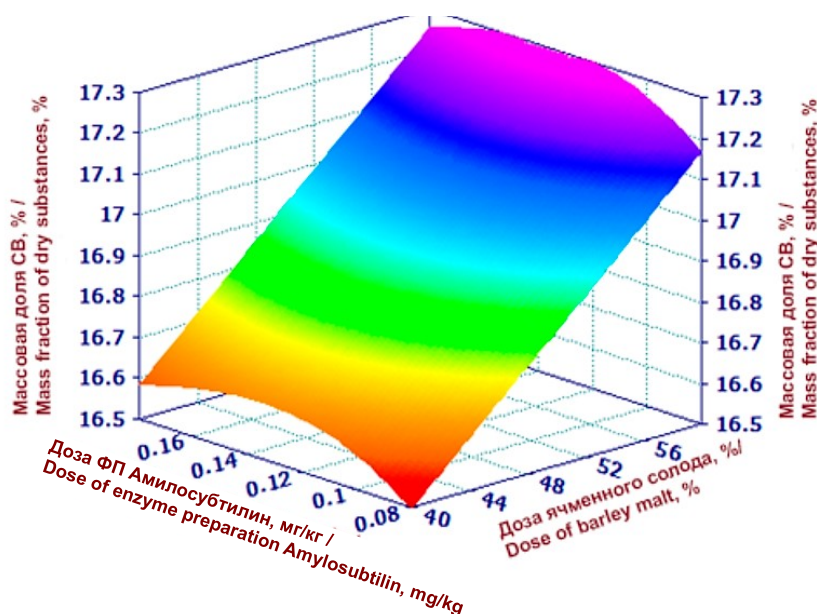


Рис. 2. Поверхность отклика изменения массовой доли СВ /
 Fig. 2. Response surface of change in dry matter mass fraction

Из данных рисунка 2 следует, что диапазон оптимума массовой доли СВ в пивном сусле изменяется от 16,7 до 17,3 % (зеленая область) при вариации дозы ячменного солода от 46 до 54 % и изменении дозы ФП Амилосубтилин от 0,08 до 0,16 мг/кг.

Представленная модель имеет высокий уровень адекватности, т. к. коэффициент корреляции практически равен единице (0,998) и относительная ошибка равна 0,1 %, следовательно, модель может с высоким уровнем достоверности использоваться при проведении операции прогнозирования.

Математическая модель описывается зависимостью вида:

$$Z_1 = a + b \cdot X + c \cdot \sqrt{Y} \cdot \ln Y,$$

коэффициент детерминации: $R^2 = 0,998$.

Аппроксимирующая функция подобрана программой автоматически с учетом введенных экспериментальных данных. Подставив статистические оценки параметров построенной модели, вычисленные с помощью Table Curve 3D, получаем уравнение

$$Z_1 = 10,363 + 0,0336 \cdot X - 6,701 \cdot \sqrt{Y} \cdot \ln Y.$$

В качестве примера прогнозирования модели рассчитаем данные, которые не попали в экспериментальное поле, а именно, содержание СВ в пивном сусле при дозе ячменного сусла – $x = 45$ % и дозы ФП Амилосубтилин, равной $y = 0,12$ мг/кг. Подставляем данные x и y в разработанную модель, имеем:

$$Z_1 = a + bx + c \cdot \sqrt{y} \cdot \ln y = 10,363 + 1,512 - 6,701 \cdot \sqrt{0,12} \cdot \ln 0,12 = 16,8.$$

Полученный результат «Экстрактивность начального сусла 16,8 %» означает, что сусло на 16,8 % состоит из СВ, содержащихся в солоде. Это подтверждает тот факт, что экстрактивность начального сусла пива напрямую влияет на содержание сухих веществ в конечном продукте. Чем выше экстрактивность, тем больше растворимых веществ (сахаров, белков, минералов и других компонентов) переходит в сусло во время варки. Более высокая экстрактивность – больше растворимых веществ извлекается из солода и других ингредиентов, что ведет к более насыщенному суслу по содержанию сухих веществ. Концентрация сухих веществ – при более высокой экстрактивности итоговая концентрация сухих веществ в сусле увели-

чивается, что влияет на последующие стадии брожения и конечный вкус пива. Необходимо пояснить, что экстрактивность начального сусла можно назвать начальной плотностью, т. е. процентное содержание сухих веществ в пивном сусле до начала процесса брожения. Большая часть этих веществ – это сахара, полученные из солода. Высокая экстрактивность указывает на большое количество сахаров, что в конечном итоге приводит к более насыщенному солодовому вкусу пива.

В готовом пиве СВ преобразуются дрожжами во время затирания, т. е. первого этапа производства пива. На данном этапе производства, когда дробленый солод и зерно добавляются в чан с подогретой водой, где пророщенные зерна выдерживают до двух–трех часов. Именно в этот момент ферменты, содержащиеся в солоде, переводят некоторые его вещества (крахмал и белок) в раствор сахаров и аминокислот. При разной температуре воды происходит активизация ферментов и растворение различных веществ. Нагрев воды и солода производят постепенно, при выдерживании пауз, тем самым запуская процесс «вытягивания» различных компонентов в основной продукт. Чем выше экстрактивность начального сусла, тем ярче и полнее солодовый вкус пива (чем ниже доля СВ, тем пиво более легкое и освежающее).

На рисунке 3 представлено изменение ДВ пивного сусла, которая характеризуется измерением вязкости или вязкотекучести жидкости (жидкость: жидкая, текучая субстанция). По данному показателю можно спроецировать дальнейшие действия: чем выше значение параметра «вязкость», тем более тягучая (вязкая) жидкость; чем меньше вязкость, тем он более жидкий (текучий). Наибольшее значение показатель ДВ имеет для подбора оборудования с целью контроля производственного процесса. Значение оптимума для ДВ в пределах 1,46 – 1,48 мПа*с. Доза ФП наиболее адекватна при внесении 0,12 мг/кг смеси. Можно просчитать пропорции для состава затора (50:50, пшеничный и ячменный солод соответственно).

Модель изменения динамической вязкости имеет следующий вид:

$$Z_3 = a + b \cdot X^{-1} + c \cdot Y^3,$$

где: коэффициенты модели: $a = 1,691$; $b = -5,912$;
 $c = -42,015$;

коэффициент корреляции модели: $R^2 = 0,999$.

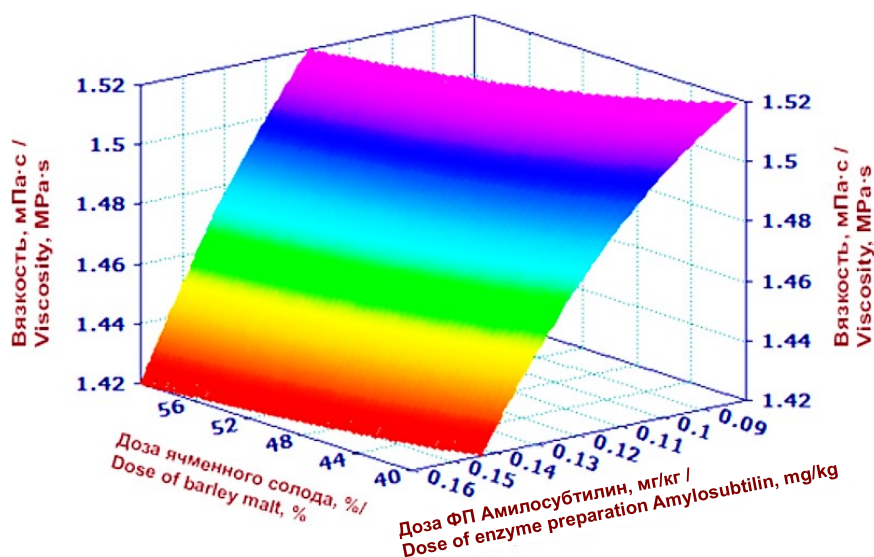


Рис. 3. Изменение ДВ пивного сусла /
Fig. 3. Changes in the dynamic viscosity of beer wort

Поверхность отклика изменения КСС в пивном сусле представлена на рисунке 4. Для технологической оценки углеводного состава пивного сусла важным показателем

является конечная степень сбраживания. Определение этого показателя основано на сбраживании сусла дрожжами с последующим нахождением количества сброженного экстракта.

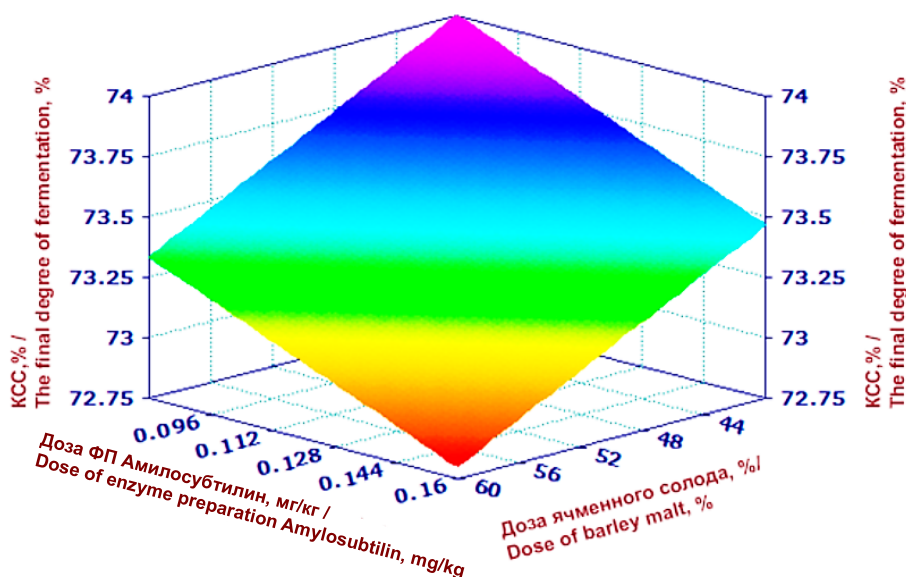


Рис. 4. Поверхность отклика изменения КСС в пивном сусле /
Fig. 4. Response surface of change in the final degree of attenuation in beer wort

Математическая модель изменения КСС имеет следующий вид:

$$Z_4 = a + b \cdot X + c \cdot Y,$$

где: коэффициенты модели равны: $a = 75,867$;
 $b = -0,033$; $c = -6,667$;
коэффициент корреляции модели: $R^2 = 1$.

Математическая модель изменения КСС пивного сусла представлена линейной зависимостью:

$$Z_4 = 75,867 - 0,033 \cdot X - 6,667 \cdot Y.$$

Охарактеризуем коэффициенты математической модели – при увеличении дозы

ячменного солода на 1 % КСС уменьшается на 0,033 %, при увеличении дозы ФП на 1 мг/кг, конечная степень сбраживания уменьшается на 6,667 %. По аппроксимирующей плоскости можно сделать следующие выводы: оптимальное значение КСС находится в промежутке от 73,00 до 73,25 % при дозе ячменного солода от 42,0 до 46,0 % и дозе ФП – от 0,08 до 0,11 мг/кг.

Основной процесс при производстве пива – спиртовое брожение сахаров сусла под действием ферментов дрожжей, т. е. происходит изменение химического состава сусла и превращение его в пиво. Большое значение при этом имеют первоначальный состав сусла (содержание в нем сбраживаемых сахаров, несбраживаемых углеводов, азотистых веществ, фосфатов, неорганических солей и др.) и дрожжи.

При главном брожении большая часть экстрактивных веществ превращается в продукты брожения. На основании проведенного анализа математических моделей установлено, что оптимальная КСС составляет 73,00÷73,25 % при следующих условиях проведения процесса сбраживания: доза композиционного состава затора составляет 46 % при соотношении пшеничного и ячменного солода 50:50 соответственно, доза ФП – 0,10 мг/кг.

На рисунке 5 представлено изменение активной кислотности пивного сусла, которое зависит от активности ферментов, а также выделения танинов из оболочки зерна. Изучая вопрос об активной кислотности, необходимо отметить важность именно затора.

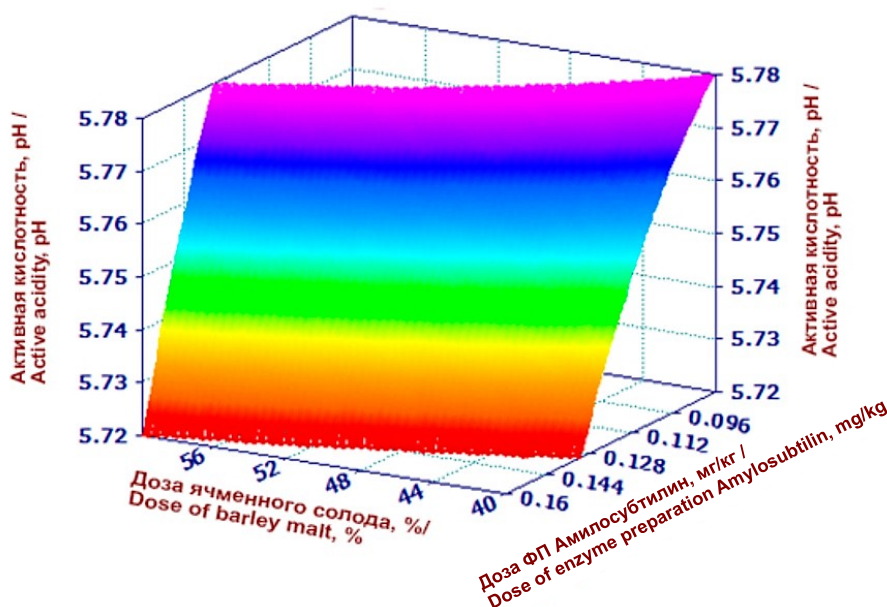


Рис. 5. Изменение активной кислотности пивного сусла /
Fig. 5. Changes in the active acidity of beer wort

Математическая модель изменения активной кислотности имеет вид:

$$Z_5 = a + b \cdot X + c \cdot Y^3,$$

где: коэффициенты модели: $a = 5,672$; $b = 0,003$;
 $c = -34,379$;

коэффициент корреляции модели: $R^2 = 0,999$;
относительная погрешность модели не превышает 0,04 %.

Согласно проведенному математическому моделированию, установили оптимум для значения pH (5,72–5,73), который находится в определенных пределах, что не противоречит основам пивоварения.

Сравнительная оценка параметров активности ферментного препарата с контрольными данными представлена в таблице 6 (контроль – показатели качества без внесения ФП, принятые за 1).

С помощью программы Table Curve 3D построены аппроксимирующие функции математических моделей ряда физико-химических показателей, определены оптимальные значения, от числовых значений которых зависит качество и органолептическая оценка готового пива.

Таблица 6 – Сравнительная оценка качественных показателей пива /
Table 6 – Comparative assessment of beer quality indicators

Показатель / Indicator	Опытные образцы / Experimental samples	
	контроль / control	опыт (ФП Амилосубтилин) / experiment (Enzyme preparation Amilosubtilin)
Массовая доля сухих веществ в сусле / Mass fraction of dry substances in wort	1	1,02
Объемная доля спирта / Volume fraction of alcohol	1	1,01
КСС / The final degree of attenuation	1	1,07
Высота пены / Foam height	1	1,02
Пеностойкость / Foam resistance	1	1,03
Активная кислотность / Active acidity	1	0,957

Заключение. В ходе проведения экспериментальных исследований определены физико-химические показатели: получение пивного сусла; продолжительность осахаривания; конечная степень сбраживания; массовая доля сухих веществ в заторе; объемная доля спирта; высота пены; пеностойкость. На основании полученных данных построены математические модели процесса ферментации пивного сусла с использованием ФП Амилосубтилин, которые отличались высоким уровнем адекватности, величиной коэффициентов корреляции не менее 0,99 и относительной погрешностью не более 0,5 %.

Рассмотренные математические модели позволили осуществить прогнозирование показателей процесса ферментации, не установленных экспериментальным путем, с минимальной погрешностью прогноза.

Сравнительный анализ экспериментальных данных показал, что наилучшими обладает крафтовое пиво с ФП Амилосубтилин, при применении которого массовая доля сухих веществ увеличилась в 1,02 раза (2 %), объемная доля спирта в 1,01 (1 %) и КСС в 1,07 (7 %) раза. Экспериментально было доказано, что применение ячменного солода улучшит показатели пивного

сусла: экстрактивность, продолжительность осахаривания, диастатическую силу, конечную степень сбраживания. Для оптимизации технологического процесса готового крафтового пива на этапе затираания рекомендуется добавлять ферментный препарат в оптимальной дозировке, что позволит уменьшить время осахаривания и увеличить объемную долю спирта. В целом применение выбранного ферментного препарата при производстве пива повысит эффективность производства и улучшит его качество. Данный подход позволит расширить ассортиментный ряд, снизить издержки и сократить срок выработки крафтового пива. Однако необходимо учитывать, что использование в превышающей дозировке ферментного препарата может привести к изменению вкуса и аромата пива, поэтому необходимо проводить тщательное тестирование и контроль качества в процессе производства.

В дальнейшем можно продолжить исследование в этой области, чтобы установить оптимальные дозировки ферментных препаратов для различных типов пива и разработать новые комплексы ферментных препаратов, которые могут улучшить качество пива и повысить эффективность производства.

References

1. Cabras I. Craft Beer in the EU: Exploring Different Markets and Systems Across the Continent. The Geography of Beer. N. Hoalst-Pullen, M. Patterson (eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2020. pp. 149–157. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-41654-6_12
2. Larroque M. N., Carrau F., Fariña L., Boido E., Dellacassa E., Medina K. Effect of Saccharomyces and non-Saccharomyces native yeasts on beer aroma compounds. International Journal of Food Microbiology. 2021;337:108953. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108953>
3. Афанасьева О. Г., Иванов Е. А., Макушев А. Е. Анализ состояния и перспектив мировой пивоваренной промышленности и ее влияния на хмелеводческую отрасль. Аграрный вестник Урала. 2023;23(11):109–119. DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2023-23-11-109-119> EDN: OBKCAС
4. Afanaseva O. G., Ivanov E. A., Makushev A. E. Analysis of the state and prospects of the global brewing industry and its impact on the hop industry. Agrarnyy vestnik Urala = Agrarian Bulletin of the Urals. 2023;23(11):109–119. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2023-23-11-109-119>
5. Миллер Ю. Ю. Концептуальный подход к разработке ферментированных зерновых напитков. Пиво и напитки. 2023;(3):11–16. DOI: <https://doi.org/10.52653/PIN.2023.03.03.003> EDN: XDFBRT
6. Miller Yu. Yu. New scientific and practical approaches to the production of fermented grain drinks. Pivo i napitki = Beer and beverages. 2023;(3):11–16. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.52653/PIN.2023.03.03.003>
7. Medina K., Giannone N., Dellacassa E., Schinca C., Carrau F., Boido E. Commercial craft beers produced in Uruguay: Volatile profile and physicochemical composition. Food Research International. 2023;164:112349. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112349>

6. Siesto G., Pietrafesa R., Tufariello M., Gerardi C., Grieco F., Capece A. Application of microbial cross-over for the production of Italian grape ale (IGA), a fruit beer obtained by grape must addition. *Food Bioscience*. 2023;52:102487. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102487>
7. Tham A., Campton J., Cooper-McKenzie B. Tapping into flavourful journeys: a systematic review and application of craft beer tourism frameworks. *International Journal of Wine Business Research*. 2023;23:343. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJWBR-03-2023-0013>
8. Haddad F. F., Ribeiro A. P. L., Vieira K. C., Pereira R. C., Carneiro J. D. S. Specialty beers market: a comparative study of producers and consumers behavior. *British Food Journal*. 2023;125(4):1282–1299. DOI: <https://doi.org/10.1108/BFJ-10-2021-1090>
9. Bimbo F., De Meo E., Baiano A., Carlucci D. The Value of Craft Beer Styles: Evidence from the Italian Market. *Foods*. 2023;12(6):1328. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12061328>
10. Bertuzzi T., Mulazzi A., Rastelli S., Donadini G., Rossi F., Spigno G. Targeted healthy compounds in small and large-scale brewed beers. *Food Chemistry*. 2020;310:125935. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125935>
11. Rizzon F., De Toni D., Graciola A. P., Milan G. S. Prost with craft beer! Do customer experience and price sensitivity affect product price image, perceived value and repurchase intention? *British Food Journal*. 2023;125(7):2333–2349. DOI: <https://doi.org/10.1108/BFJ-05-2022-0456>
12. Aredes R.-S., Peixoto F.-C., Sphaier L.-A., Marques F.-F. Evaluation of craft beers through the direct determination of amino acids by capillary electrophoresis and principal component analysis. *Food Chemistry*. 2021;344:128572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128572>
13. Baiano A. Craft beer: An overview. *Comprehensive reviews in food science and food safety*. 2021;20(2):1829–1856. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12693>
14. De Flavii R., Santarelli V., Mutarutwa D., Giuliani M., Sacchetti G. Volatiles profile of ‘Blanche’ wheat craft beer as affected by wheat origin: A chemometric study. *Food Chemistry*. 2022;385:132696. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132696>
15. Ермолаева Г. А., Ермолаев С. В. Современные технологии пива и пивных напитков на малых предприятиях. Часть I. Пиво и напитки. 2022;(1):15–21. DOI: <https://doi.org/10.52653/PIN.2022.01.01.009> EDN: ETOZZH
- Ермолаева Г. А., Ермолаев С. В. Modern technologies of beer and beer drinks at small enterprises. Part I. *Pivo i napitki* = Beer and beverages. 2022;(1):15–21. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.52653/PIN.2022.01.01.009>
16. Miao Y., Gong S., Zhang Z., Xiao Y., Wang K., Zhao L., Hu Z. Physicochemical properties and antioxidant activity analysis of craft beers brewed by different litchi varieties. *Food and Fermentation Industries*. 2021;47(13):174–179. DOI: <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026699>
17. Atallah S. S., Bazzani C., Ha K. A., Nayga R. M. Does the origin of inputs and processing matter? Evidence from consumers’ valuation for craft beer. *Food Quality and Preference*. 2021;89:104146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2020.104146>
18. Villacreses S., Blanco C. A., Caballero I. Developments and characteristics of craft beer production processes. *Food Bioscience*. 2022;45:101495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101495>

Сведения об авторах

Шадрин Максим Александрович, кандидат техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Биотехнология, технология общественного питания и товароведение», ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», ул. Мира, д. 11, г. Омск, Российская Федерация, 644050, e-mail: info@omgtu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3786-4948>

✉ **Бураковская Нина Владимировна**, кандидат техн. наук, доцент кафедры «Биотехнология, технология общественного питания и товароведение», ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», ул. Мира, д. 11, г. Омск, Российская Федерация, 644050, e-mail: info@omgtu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9419-6731>, e-mail: burakovskaya-nina@mail.ru

Молибога Елена Александровна, доктор техн. наук, профессор кафедры «Биотехнология, технология общественного питания и товароведение», ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», ул. Мира, д. 11, г. Омск, Российская Федерация, 644050, e-mail: info@omgtu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7226-5962>

Щукина Наталья Викторовна, кандидат пед. наук, доцент кафедры математических и естественнонаучных дисциплин, ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина», Институтская площадь, д. 1, г. Омск, Российская Федерация, 644008, e-mail: adm@omgau.org, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3287-2017>

Приставка Мария Ивановна, аспирант, ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», ул. Мира, д. 11, г. Омск, Российская Федерация, 644050, e-mail: info@omgtu.ru

Information about the authors

Maxim A. Shadrin, PhD in Engineering, associate professor, Head of the Department «Biotechnology, Catering Technology and Food Science», Omsk State Technical University, 11, Mira str., Omsk, Russian Federation, 644050, e-mail: info@omgtu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3786-4948>

✉ **Nina V. Burakovskaya, PhD in Engineering**, associate professor, the Department «Biotechnology, Catering Technology and Food Science», Omsk State Technical University, 11, Mira str., Omsk, Russian Federation, 644050, e-mail: info@omgtu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9419-6731>, e-mail: burakovskaya-nina@mail.ru

Elena A. Moliboga, DSc in Engineering, professor at the Department «Biotechnology, Catering Technology and Food Science», Omsk State Technical University, 11, Mira str., Omsk, Russian Federation, 644050, e-mail: info@omgtu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7226-5962>

Natalya V. Shchukina, PhD in Pedagogical Science, associate professor, the Department of Mathematics and Natural Sciences, Omsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin, Institutskaya Square, 1, Omsk, Russian Federation, 644008, e-mail: adm@omgau.org, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3287-2017>

Maria I. Pristavka, graduate student, Omsk State Technical University, 11, Mira str., Omsk, Russian Federation, 644050, e-mail: info@omgtu.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.840–851>

УДК 631.6

**Повышение эффективности управления водопользованием
оросительных систем: методология и технология**

© 2025. Д. А. Рогачев ✉

ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации
имени А. Н. Костякова», г. Москва, Российская Федерация

Цель исследования – усовершенствовать управление системным водопользованием для повышения эффективности управляющих воздействий в условиях ограничения природных ресурсов и финансирования эксплуатационных мероприятий. Материалом исследований служили публикации, фондовые материалы; сведения о работе межхозяйственных оросительных систем, технологиях назначения и критериях оценки эффективности управленческих решений; правила распределения воды и другие материалы, необходимые для достижения цели исследования. В ходе работы для оптимизации технологических процессов водопользования применены методы математического моделирования и прогнозирования, основанные на вероятностных подходах, а также методы математического и генетического программирования, нейросетевого моделирования, машинного обучения и обработки большого объема данных. Разработана интеллектуальная информационно-советующая компьютерная система поддержки принятия решений по управлению системным водопользованием, сочетающая многокритериальное оптимизационное моделирование с методами искусственного интеллекта и современными геоинформационными технологиями. Она объединяет несколько ключевых подсистем: Управление водораспределением, Техническая эксплуатация, ГИС-интеграция, Прогнозирование, Цифровой двойник управления водохозяйственной организацией, Администрирование. Автоматизированное планирование распределения воды в условиях её дефицита осуществляли на основе экономико-математического моделирования. В процессе использовали многокритериальную функцию и генетический алгоритм оптимизации, что позволяло достичь максимальной эффективности. Для оптимизации процедур планирования мероприятий по технической эксплуатации применяли дискретную математическую модель, представляющую собой частный случай общей транспортной задачи математической оптимизации. Результаты апробирования АСУ на материалах службы эксплуатации мелиоративного водохозяйственного комплекса показали значительное повышение эффективности использования воды и надёжности сооружений оросительных систем. Это стало возможным благодаря развитию информационной и технологической поддержки управленческих решений водохозяйственных организаций. Так, эффективность планирования водораспределения в сложных метеорологических условиях, когда наблюдается дефицит воды, повышается на 10 % по сравнению с традиционным методом, который подразумевает сокращение подачи воды в зависимости от уровня водообеспеченности оросительной системы. Реализация многокритериального экономико-математического моделирования и искусственного интеллекта при выборе первоочередных объектов ремонтно-восстановительных работ снизила возможный ущерб на 10–15 % в сравнении с однокритериальными решениями, которые основываются на максимизации площади орошаемых земель, доходности водохозяйственной организации или сокращении потерь поливной воды.

Ключевые слова: системное водопользование, управление, моделирование, генетические алгоритмы, автоматизация

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова» (тема № FGUF–2022–0001). Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Рогачев Д. А. Повышение эффективности управления водопользованием межхозяйственных оросительных систем: методология и технология. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(4):840–851.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.840–851>

Поступила: 02.04.2025

Принята к публикации: 17.07.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

Improving the efficiency of water use management of irrigation systems: methodology and technology

© 2025. Dmitry A. Rogachev✉

All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation
named after A. N. Kostyakov, Moscow, Russian Federation

The purpose of the study is to improve the management of systemic water use, ensuring an increase in the effectiveness of control actions, which is especially critical in conditions of limited natural resources and financing of operational measures. The research materials were publications, stock materials; information on the operation of inter-farm irrigation systems, technologies for their purpose and criteria for evaluating the effectiveness of management decisions; rules for water distribution and other materials necessary to achieve the purpose of the study. In the course of the research, mathematical modeling and forecasting methods based on probabilistic approaches, as well as methods of mathematical and genetic programming, neural network modeling, machine learning and big data processing were used to optimize technological processes of water use. An intelligent information and advisory computer decision support system for managing systemic water use has been developed, combining multi-criteria optimization modeling with artificial intelligence methods and modern geoinformation technologies. It combines several key subsystems: Water distribution management, Technical operation, GIS integration, Forecasting, Digital twin of water management organization, Administration. Automated planning of water distribution in conditions of water scarcity is carried out on the basis of economic and mathematical modeling. The process uses a multi-criteria function and a genetic optimization algorithm, which allows for maximum efficiency. A discrete mathematical model is used to optimize the planning procedures for technical operation, which is a special case of the general transport task of mathematical optimization. The results of testing automated control systems on the materials of the meliorative water management complex operation service showed a significant increase in water use efficiency and reliability of irrigation system structures. This became possible due to the development of information and technological support for management decisions of water management organizations. Thus, the efficiency of water distribution planning in difficult meteorological conditions, when there is a shortage of water, increases by 10 % compared to the traditional method, which involves reducing water supply depending on the level of water availability of the irrigation system. The implementation of multi-criteria economic and mathematical modeling and artificial intelligence in the selection of priority repair and restoration facilities reduced possible damage by 10–15 % compared to single-criteria solutions that are based on maximizing the area of irrigated land, profitability of a water management organization or reducing irrigation water losses.

Keywords: systemic water use, management, modeling, genetic algorithms, automation

Acknowledgments: the work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov (theme No. FGUF–2022–0001).

The author thanks the reviewers for their contribution to the expert assessment of this work.

Conflict of interest: the author declared no conflict of interest.

For citation: Rogachev D. A. Improving the efficiency of water use management of irrigation systems: methodology and technology. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):840–851. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.840-851>

Received: 02.04.2025

Accepted for publication: 17.07.2025

Published online: 29.08.2025

В современном мире, где водные ресурсы становятся всё более ограниченными, решение проблем водопользования приобретает особую значимость. Эффективное использование водных ресурсов не только способствует сохранению окружающей среды, но и обеспечивает устойчивое развитие сельского хозяйства, промышленности и других отраслей экономики. Особенно остро проблема управления водопользованием встает в контексте межхозяйственных оросительных систем (ОС), которые играют важную роль в обеспечении продовольственной безопасности и развитии сельского хозяйства, представляющего одну из наиболее водоемких сфер производства.

Управление водопользованием межхозяйственных оросительных систем является сложным процессом, требующим учёта множества факторов [1]. В первую очередь к ним относятся:

- природно-климатические условия: климат, рельеф, гидрологические особенности региона, в котором расположена оросительная система;

- хозяйственные условия: тип сельскохозяйственных культур, выращиваемых на орошаемых землях, их водопотребление, а также экономические условия ведения сельского хозяйства;

- технические условия: состояние и эффективность оросительных систем, наличие и качество оборудования для управления водопользованием.

Проблемы водопользования, обусловленные природно-хозяйственными факторами, усугубляются в условиях дефицита ресурсов, из которых наиболее критичны дефицит поливной воды и недостаточное финансирование ремонтно-восстановительных работ. Для обеспечения должной эффективности использования

водных ресурсов с учетом интересов всех участников процесса водопользования необходима информационная поддержка принимаемых решений по межхозяйственному водораспределению и/или выбору первоочередных мероприятий технической эксплуатации, что успешно реализуется на основе оптимизационного моделирования.

Инновационные технологии, такие как искусственный интеллект (ИИ), машинное обучение (МО) и цифровые двойники (ЦД), открыли новые возможности для совершенствования управления водопользованием в орошении [2, 3, 4]. В условиях современных вызовов и глобальных трендов автоматизированные системы управления технологическими процессами становятся ключевым инструментарием для снижения рисков при планировании и реализации водоподачи [5, 6]. Этот подход доказал свою эффективность как на международном уровне, так и в отечественной практике. К сожалению, сейчас в службе эксплуатации мелиорации указанные инновационные подходы, как правило, не практикуются, в то время как цифровая трансформация управления технологическими процессами и производством признается неотъемлемым фактором успешности управляющих воздействий и конкурентоспособности организации [7, 8]. Таким образом, повышение эффективности водопользования является актуальным и имеет большое практическое значение.

В настоящей работе представлены результаты совершенствования методологии и цифровой трансформации технологий управления водопользованием на межхозяйственных оросительных системах в напряженных природно-хозяйственных условиях на основе оптимизационного моделирования и применения цифровых двойников менеджмента водохозяйственной организации в составе интеллектуальных автоматизированных систем.

Цель исследования – усовершенствовать управление системным водопользованием для повышения эффективности управляющих воздействий в условиях ограничения природных ресурсов и финансирования эксплуатационных мероприятий.

Научная новизна – разработка новых подходов к управлению системным водопользованием на основе методов много критерияльной оптимизации, нейросетевого моделирования и генетических алгоритмов для автоматизированного водораспределения в условиях дефицита водных и ресурсных ограничений,

не практикующихся в настоящее время в сфере мелиорации.

Материал и методы. Материалом служили итоги исследований специалистов Федерального научного центра гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова, нормативно-методическая документация и данные водохозяйственных организаций Министерства сельского хозяйства Российской Федерации.

Методы исследований включали: экспертные оценки; экономико-математическое, стохастическое моделирование и прогнозирование; математическое и генетическое программирование и оптимизацию; искусственный интеллект и нейросетевое моделирование.

Результаты и их обсуждение. Проблемы планирования, реализации, совершенствования и развития водопользования орошаемого земледелия изучаются в России достаточно давно, заметно активизируясь в периоды масштабного развития мелиорации. Действующие в настоящее время нормативно-методические документы управления государственными оросительными системами сформированы в 60-80-х гг. прошлого столетия и не отвечают требованиям трансформирующихся природно-хозяйственных условий страны, обусловленных изменением климата, наличием частной собственности на землю и тому подобными факторами.

Приоритетным мероприятием становления системного водопользования, отвечающего современным требованиям АПК, признается цифровая трансформация водопользования, интерес к которой уже реализуется в исследованиях [2, 9] и требует дальнейшего масштабного развития.

Выполненный анализ существующих подходов к управлению водопользованием мелиоративного водохозяйственного комплекса выявил следующие ключевые направления его совершенствования [10, 11]:

- Минимизация непроизводительных затрат водных ресурсов для обеспечения устойчивого водопользования и поддержания экологического баланса территории.
- Приоритетное использование современных технологий и техники, что способствует повышению эффективности орошения.
- Учет климатических изменений и их воздействия на водные ресурсы для разработки адаптивных стратегий управления водопользованием.
- Разработка системы мониторинга для контроля использования водных ресурсов,

оценки эффективности водоподдачи, оперативного выявления и устранения проблем.

- Внедрение системы управления рисками, минимизирующей ущерб, связанные с дефицитом воды или другими факторами, влияющими на водопользование.

- Учет экономических факторов, таких как стоимость воды и эффективность орошения при разработке методологии управления водопользованием.

- Создание интегрированных систем управления водопользованием, реализующих его различные аспекты: использование водных ресурсов, охрана окружающей среды, социально-экономическое развитие территории и т. п.

- Сотрудничество с заинтересованными сторонами: фермерами, органами власти, научными организациями и общественностью, способствующее эффективности управления водопользованием.

- Повышение осведомленности и обучение персонала новым методам и технологиям.

Реализация этих направлений с использованием структурных элементов цифровизации (автоматизация принятия решений и рутинных задач, интеграция данных, искусственный интеллект, интеллектуальные системы управления, мониторинг и анализ, обучение и развитие) позволит повысить эффективность использования водных ресурсов на орошении и обеспечить устойчивое развитие сельского хозяйства.

В настоящей работе выполнены следующие исследования по совершенствованию методологии и технологии управления водопользованием на межхозяйственных оросительных системах:

- сформированы критерии многофакторной оценки эффективности управленческих воздействий на процесс водопользования;

- определены правила оптимизации системного плана водораспределения в условиях дефицита водных ресурсов, поскольку традиционный подход сокращения плановой водоподдачи пропорционально изменению водозабора на систему не учитывает потери урожайности конкретных сельскохозяйственных культур для конкретных пользователей и не позволяет оптимизировать ущерб недополива в целом по системе;

- создано методическое обеспечение, регламентирующее процедуры корректировки плана водопользования на этапе реализации;

- разработаны модель оптимизации и технология распределения ограниченных финансовых ресурсов с использованием генетического алгоритма при планировании мероприятий технической эксплуатации, что обеспечит достоверность прогнозируемого результата и выбор наиболее эффективного варианта;

- создана модель цифрового двойника управления менеджментом водохозяйственной организации с учетом интеграции эндогенных и экзогенных потоков информации автоматизированной системы управления водопользованием. Применение современных технологий цифровой трансформации менеджмента водохозяйственных организаций способствует повышению эффективности и снижению затрат на эксплуатацию оросительных систем;

- адаптирована совокупность нейросетевых моделей для краткосрочного прогнозирования урожайности на основе глубоких нейронных сетей комбинированной архитектуры, включающих рекуррентные и сверточные слои. Разработка новых методов повышения эффективности управленческих воздействий на межхозяйственных оросительных системах может стать продуктивным направлением исследований, способствующим результативности водопользования;

- предложена концептуальная модель, созданы методическое обеспечение, информационно-аналитическая технология и прототип автоматизированной системы управления водопользованием, базирующиеся на рациональных решениях, интеллектуальном управлении технологическими процессами и производством. Это повысит качество управляющих воздействий, снизит нагрузку на управленцев и ускорит процесс принятия решений.

Структурно-функциональная схема совершенствования методологии управления водопользованием, иллюстрирующая функциональные блоки методологии, с перечнем структурных элементов, разработанных в ходе исследований, представлена на рисунке 1. Основные улучшения коснулись структурных элементов следующих функциональных блоков: «Планирование и организация», «Автоматизация и модернизация», а также «Мониторинг и оценка результатов деятельности сельскохозяйственной организации». Разработанные в составе исследований решения по алгоритмам и процедурам, моделям и автоматизированная система способствуют цифровой трансформации управления водопользованием.



Рис. 1. Структурно-функциональная схема совершенствования методологии управления водопользованием на межхозяйственных оросительных системах /

Fig. 1. Structural and functional scheme for improving the methodology of water use management at inter-farm irrigation systems

Базовые модели управления технологическими процессами водопользования на межхозяйственных оросительных системах представлены оптимизационными моделями распределения ограниченных водных ресурсов и оптимизации планирования мероприятий технической эксплуатации (табл.).

Экономико-математическая модель оптимизации водораспределения на межхозяйственных оросительных системах обеспечивает планирование водораспределения между потребителями с учетом принципов равноправности и непрерывности водоподачи, что особенно критично в напряженных метеорологических условиях.

Максимизируемая многокритериальная целевая функция, характеризующая успешность мероприятия, включает следующие критерии: выручка от продажи продукции растениеводства на орошении; площадь орошаемых земель; доход водохозяйственной организации. Балансировка частных критериев интегрального показателя может осуществляться с помощью весовых коэффициентов, вычисляемых специалистами методом экспертных оценок.

С учетом нелинейности функции цели поиск оптимального плана водоподачи выпол-

няется эволюционно-генетическим методом, не требующим вычисления производных. Использование модели повышает эффективность использования водных ресурсов при учете интересов всех участников процесса водопользования. Материалы, характеризующие постановку задачи, математическое описание модели и другие, представлены в работе [12].

Приоритетным методом управления техническим состоянием оросительных систем в работе принят метод многокритериальной оптимизации, приоритет которого установлен в результате анализа существующих подходов к выбору управляющих воздействий и собственных исследований автора. В качестве целевой функции используется показатель успешности плана ремонтно-восстановительных работ, который учитывает площадь орошаемых территорий, прогнозируемое снижение потерь воды при поливе и ожидаемый финансовый результат водохозяйственной организации. Такой подход обеспечивает комплексную оценку результатов по планированию мероприятий технической эксплуатации ОС и позволяет оптимально распределить лимитированные ресурсы, как правило, существенно ограниченные в сравнении с потребностью.

Таблица – Математические модели процессов системного водопользования /
Table – Mathematical models of systemic water use processes

<i>Модель / Model</i>	<i>Свидетельство о регистрации / Certificate of registration</i>
1. Эффективное распределение ограниченных водных ресурсов в условиях дефицита с использованием эволюционно-генетических алгоритмов и многокритериальной оптимизации / Efficient allocation of limited water resources in conditions of scarcity using evolutionary genetic algorithms and multi-criteria optimization	RU 2024611825 ¹
2. Системное водораспределение в условиях дефицита водных ресурсов с учетом их стохастичности / Systemic water distribution in conditions of scarcity of water resources, taking into account their stochasticity	RU 2024689542 ²
3. Управление техническим состоянием ОС / Management of technical condition of irrigation systems	RU 2024667866 ³
4. «Цифровой двойник» управления водохозяйственной организацией / The "digital twin" of water organization management	RU 2012610120 ⁴
5. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур в задачах системного водопользования / Forecasting crop yields in the context of systemic water use	RU 2024624450 ⁵

Математическое описание модели оптимизации распределения ресурсов на ремонтно-восстановительные работы ОС представляет частный случай специализированной транспортной задачи. Реализация оптимизационного моделирования выполняется с использованием эволюционно-генетического программирования [12] – одного из методов искусственного интеллекта.

Новым решением по цифровой трансформации процесса управления водопользованием межхозяйственных оросительных систем стала модель цифрового двойника менеджмента водохозяйственной организации, которая характеризует виртуальную копию процесса управления всеми аспектами деятельности организации, направленными на достижение её целей и задач (рис. 2).

Модель реализует процедуры, алгоритмы и задачи планирования, организации, мотивации и контроля всех ресурсов и процессов внутри организации. Обеспечивает принятие решений, координацию работы сотрудников, анализ результатов и постоянное улучшение работы организации. Этот инструмент предоставляет возможность анализировать и оптимизировать процессы управления водными ресурсами, а также прогнозировать возможные сценарии развития событий. Программный комплекс цифрового двойника водохозяйственной организации базируется на типовых программных продуктах 1С-Предприятие: 1С-ERP, 1С-Документооборот (с возможностями искусственного интеллекта); 1С-ЗУП (зарплата и управление персоналом)⁶.

¹Рогачев Д. А. Оптимизация распределения оросительной воды в условиях дефицита методом эволюционно-генетических вычислений с нелинейной многокритериальной целевой функцией: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024611825 Российская Федерация. № 2023688940: заявл. 22.12.2023; опубл. 25.01.2024. Бюл. №2. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=60780200>

²Рогачев Д. А. Обоснование структуры и оптимизация параметров оросительной системы в условиях сочетания орошаемого массива с богарным с учетом стохастичности: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024689542 Российская Федерация. № 2024687754: заявл. 18.11.2024; опубл. 06.12.2024. Бюл. №12. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=76403510>

³Рогачев Д. А. Подсистема технической эксплуатации АСУ Водопользования оросительной системы с использованием экономико-математического моделирования и методов искусственного интеллекта: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667866 Российская Федерация. № 2024666541: заявл. 17.07.2024; опубл. 31.07.2024. Бюл. №8. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69589401>

⁴Рогачев Д. А., Таранец А. В. Система автоматизации учёта и поддержки управленческих решений в сфере логистики грузоперевозок в среде 1С-Предприятие: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012610120. № 2011618187: заявл. 02.11.2011. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=55060938>

⁵Рогачев Д. А. Временные ряды данных для тренд-сезонного и нейросетевого прогнозирования урожайности зерновых культур с использованием многолетних гидрометеорологических данных в почвенно-климатических условиях Юга России: свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024624450 Российская Федерация. № 2024623872: заявл. 12.09.2024; опубл. 14.10.2024. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=73233658>

⁶Обзор системы «1С : Предприятие». [Электронный ресурс]. URL: <https://v8.1c.ru/tekhnologii/overview/> (дата обращения: 16.06.2024).

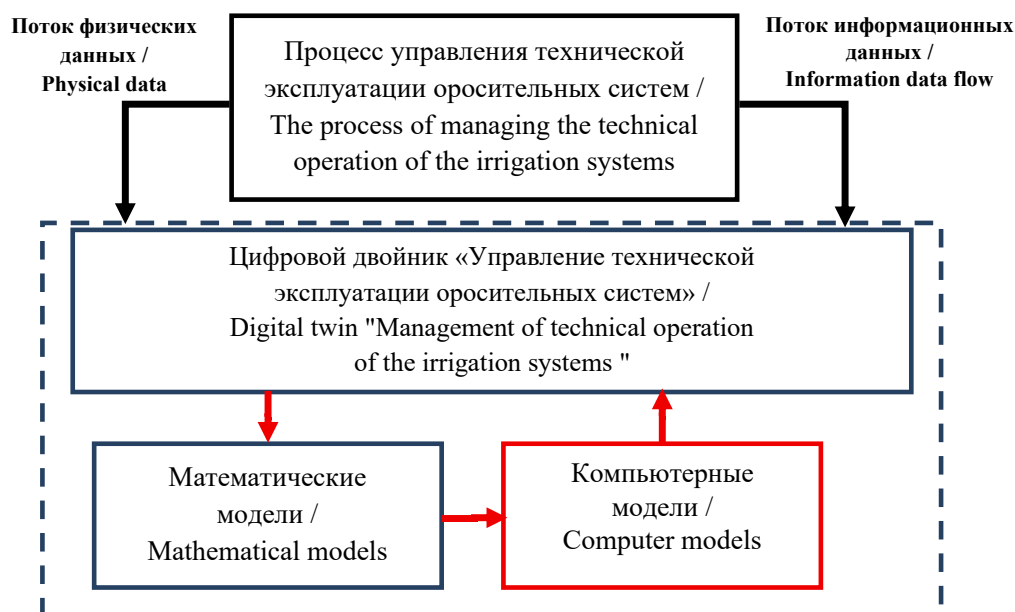


Рис. 2. Структурная схема цифрового двойника менеджмента водохозяйственной организации /
Fig. 2. Block diagram of the digital twin of a water organization management

Данный программный комплекс обеспечивает автоматизацию оперативного и регламентного учета водохозяйственной организации и интегрирован с АСУ «Водопользование». В рамках подсистемы «Цифровой двойник» АСУ «Водопользование ОС» формируется управленческая отчетность, необходимая для эффективного управления водохозяйственной организацией.

Включение в состав АСУ «Водопользование ОС» модели «Цифрового двойника менеджмента водохозяйственной организации» позволяет оценить финансовое положение организации, выявить проблемы и принять обоснованные решения, оценить способность организации поддерживать свою деятельность на долгосрочной основе. Это важно для обеспечения устойчивого развития и сохранения водных ресурсов.

Предусмотрены методы: мониторинг, финансовая отчетность, сравнение, анализ, прогнозирование ключевых показателей. Разработка цифрового двойника управления организацией – актуальная задача для современных компаний, позволяющая оптимизировать бизнес-процессы, повысить эффективность управления,

обеспечить конкурентоспособность и укрепить безопасность. Внедрение цифровых технологий становится необходимым условием успешного развития экономики в современном мире.

Для результативной реализации указанных моделей в практике службы эксплуатации межхозяйственных ОС создана концептуальная модель и разработан прототип интеллектуальной автоматизированной системы управления технологическими и финансово-экономическими процессами водопользования.

В качестве технологической платформы реализации АСУ выбрана система 1С-Предприятие – приоритетный отечественный продукт для разработки систем управления. Это позволило сфокусировать усилия на функционале разрабатываемой системы, максимально используя возможности платформы по интеграции с широким спектром внешних инструментов.

Программно-технологические средства АСУ «Водопользование ОС»⁷, разработанные с учетом инновационных научно-методологических требований, гарантирующих развитие конкурентоспособного отечественного агропроизводства, обеспечивают:

⁷Рогачев Д. А. Подсистема «Водораспределение» автоматизированной системы управления «Водопользование оросительной системы» с использованием методов искусственного интеллекта: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024681320 Российская Федерация. № 2024669439: заявл. 20.08.2024; опубл. 09.09.2024. Бюл. №9. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=69599423>; Рогачев Д. А. Автоматизированная система управления водопользования оросительной системы с использованием экономико-математического моделирования и методов искусственного интеллекта: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025618902 Российская Федерация. № 2025618902: заявл. 28.03.2025; опубл. 08.04.2025. Бюл. №4. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80655258>

1. Управление и контроль ключевых процедур водопользования: мониторинг состояния инфраструктуры ОС и водоподачи; сбор и анализ данных; принятие обоснованных решений на основе полученной информации; автоматизация рутинных задач, включая сбор данных, обработку информации и генерацию отчетов.

2. Взаимодействие с пользователем, не требующее специального уровня подготовки, гибкие настройки.

3. Высокий уровень защиты данных: надежность и безопасность, регулярное резервное копирование и восстановление, эффективная защита от вирусов.

4. Кооперацию с внешними устройствами и платформами, бесшовный обмен информацией.

5. Адаптацию системы к увеличивающимся объемам данных и растущему числу пользователей. Расширение возможностей без простоев и сбоев в работе.

6. Высокую скорость обработки данных и выполнения задач. Оптимизацию использования компьютерных ресурсов.

7. Документацию пользователю: разработана подробная документация, описывающая функционал системы, её настройки и способы решения проблем.

8. Соответствие требованиям законодательства в области защиты данных, информационной безопасности и других аспектов.

9. Настройку системы под специфические требования и условия конкретного объекта управления.

10. Тестирование: предусмотрены механизмы для отслеживания и устранения проблем, выявленных при регулярном тестировании на наличие ошибок, уязвимостей и других.

В структуре АСУ «Водопользование ОС» сформированы следующие подсистемы: Водораспределение, Техническая эксплуатация, ГИС-интеграция, Прогнозирование. Цифровой двойник. Нормативно-справочная, Администрирование. Главное меню прикладного решения позволяет переходить к одной из подсистем, осуществлять поиск по прикладному решению и выполнять сервисные функции с конфигурацией (рис. 3).

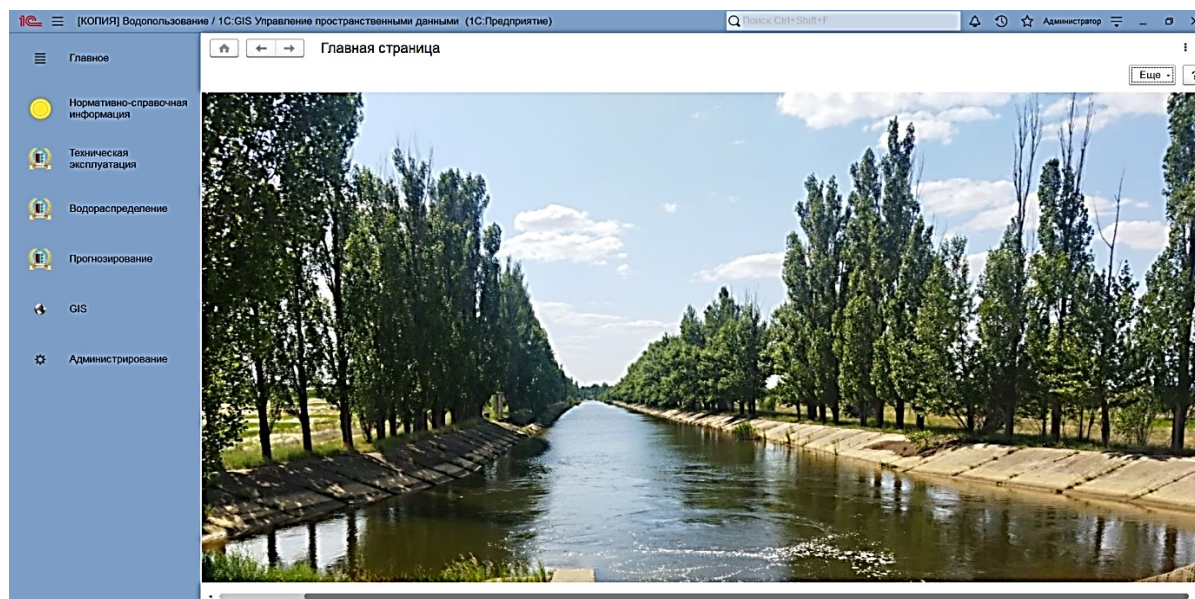


Рис. 3. Главное меню АСУ «Водопользование ОС» /

Fig. 3. The main menu of the automated control system "Water use of irrigation systems"

Подсистема «Водораспределение» реализует комплексный подход к управлению процессами подачи воды. Основные функции включают расчеты тактического (годового, сезонного) и оперативного (декадного и суточного) планирования водораспределения с применением методов многокритериального моделирования и оптимизации решений на основе эволюционно-генетического программирования.

Планирование выполняется по заявкам сельскохозяйственных товаропроизводителей с учетом социально-экономических требований водопользования на орошении, природно-хозяйственных особенностей вегетационного периода и доступности водных ресурсов.

Функциональная структура подсистемы «Водораспределение» включает разделы «Справочники», «Документы» и «Отчеты».

В разделе «Справочники» содержатся подразделы: «Водовыделы», «Период планирования водоподачи», «Потребители», «Сельскохозяйственные культуры». Они обеспечивают сбор, хранение, обработку и подготовку данных для планирования водораспределения.

Формирование планов водораспределения происходит в разделе «Документы». Модуль «Планирование подачи воды» консолидирует заявки потребителей в разрезе водовыделов, анализирует возможность их исполнения и необходимость корректировки с учетом дефицита водообеспеченности и других ограничений, связанных с природно-хозяйственными условиями. При отсутствии дефицита водообеспеченности данные заявок переносятся в модуль «Водоподача план» для разработки итогового документа. В случае дефицита водообеспеченности используется модуль «Опти-

мизировать в условиях дефицита», который запускает подпрограмму оптимизации целевой функции планирования водораспределения.

Выходные документы планирования водораспределения формируются в разделе «Сводный план водоподачи» в табличной, графической и картографической формах, которые необходимы для подготовки оперативной и/или статистической отчетности. Настройка параметров выходных отчетов выполняется с использованием специализированных форм. Пример такой формы для настройки параметров оптимизации (ограничения, целевая функция, метод решения, параметры генетического алгоритма) представлен на рисунке 4.

Встроенная ГИС-подсистема позволяет гибко настраивать визуализацию параметров потребителей на уровне пользователей (рис. 5).

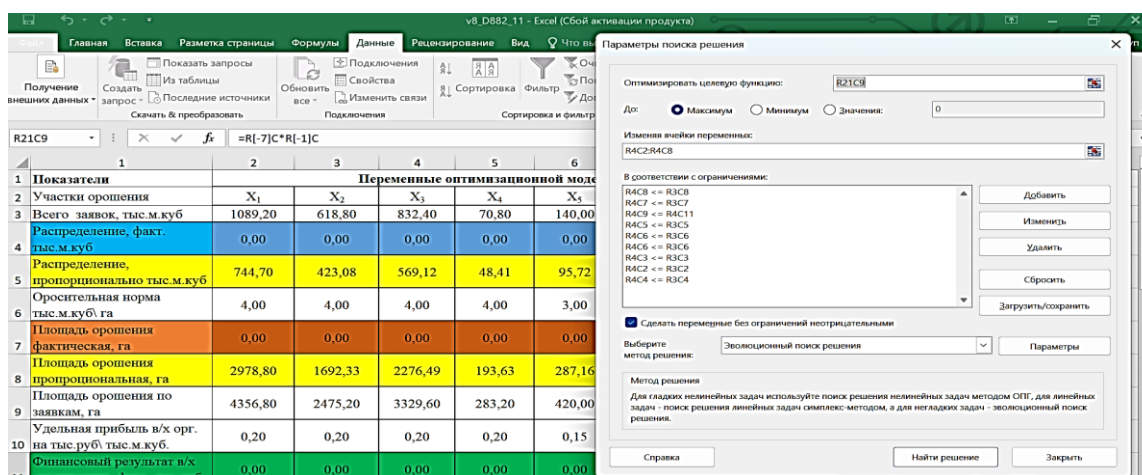


Рис. 4. Параметры запуска оптимизации многокритериальной целевой функции с использованием методов эволюционно-генетического программирования /

Fig. 4. Parameters for launching optimization of a multi-criteria objective function using methods of evolutionary genetic programming

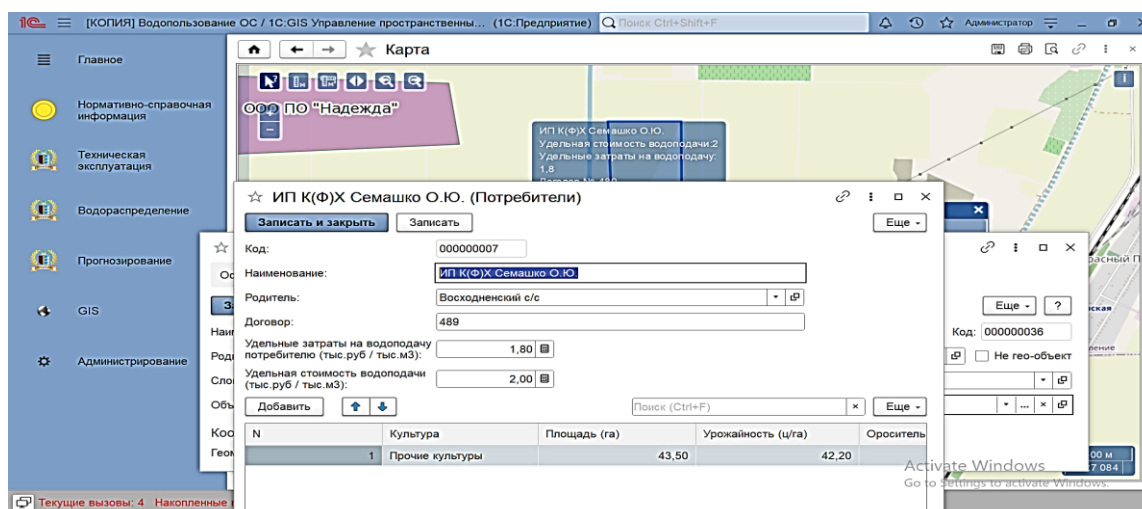


Рис. 5. Доступ к атрибутивным данным потребителей с использованием географической карты /

Fig. 5. Access to consumer attribute data using a geographic map

Подсистема «Техническая эксплуатация» предназначена для управления состоянием инфраструктуры оросительных систем. Основные задачи включают:

- мониторинг технического состояния объектов (насосные станции, трубопроводы, каналы), включая учет геометрических параметров, балансовой стоимости, состояния износа и дат последнего ремонта;
- планирование ремонтно-восстановительных работ с оптимизацией распределения ограниченных ресурсов на основе многокритериальных моделей;
- картографическая визуализация объектов инфраструктуры, данных о потребителях и запланированных мероприятиях.

Подсистема позволяет вести учет иерархической структуры объектов технической эксплуатации (раздел «Объекты ОС») и хозяйств водопотребителей (раздел «Потребители»), устанавливать связи между этими элементами и привязывать объекты к географическим координатам для более наглядной визуализации.

ГИС-подсистема в составе АСУ «Водопользование» обеспечивает:

- визуализацию технико-экономических показателей в картографической форме: состояние объектов; потери воды; количество отказов оборудования; дебиторская задолженность потребителей; удельная стоимость подачи воды; прибыль водохозяйственной организации;
- анализ технического состояния объектов с помощью методов искусственного интеллекта;
- мониторинг несанкционированных подключений;
- оценку мелиоративного состояния участков;
- прогнозирование урожайности с использованием спутниковых снимков высокого разрешения на основе методов искусственного интеллекта.

В рамках подсистемы реализована возможность получения кадастровых данных о земельных участках и других данных электронных сервисов Росреестра.

Подсистема «Прогнозирование» предназначена для сбора и обработки данных об урожайности, во многом определяющих принятие решений при планировании сезонной водоподдачи. Данные используются для анализа и оценки эффективности водопользования, которые выполняются в преддверии вегетационного периода с учетом ожидаемой продуктивности растениеводства. Достоверность и доступность этих данных критически важна

для успешного управления водопользованием. В подсистеме применяются методы моделирования временных рядов и нейронные сети для прогнозирования урожайности на основе исторических данных. Интерфейс результатов обработки модуля.

В подсистеме «Цифровой двойник» осуществляется сбор и хранение данных о процессах водопользования, а также прогнозирование на их основе последствий принимаемых управленческих решений. Основные задачи подсистемы включают:

1. Имитация управленческих сценариев: оценка различных стратегий планирования водораспределения, мероприятий технической эксплуатации и т. п.
2. Формирование управленческой отчетности: автоматизация документооборота для оценки эффективности управления.
3. Интеграция данных: использование информации о состоянии производственных процессов и финансовых потоков для анализа производительности, успешности, конкурентоспособности.

Подсистема «Администрирование» выполняет функции авторизации, управления доступом и регламентные работы по обслуживанию СУБД.

Исследования показали эффективность системы «Водопользование ОС» для решения ключевой задачи эксплуатации – водораспределения, апробированного на материалах Городищенской оросительной системы Волгоградской области. Действенность управленческих решений по планированию водораспределения в сложных метеорологических условиях при дефиците поливной воды на основе оптимизации повышена на 10 % по сравнению с традиционным методом планирования, предполагающим пропорциональное сокращение водоподдачи в зависимости от ее дефицита.

Результаты оценки эффективности моно- и мультикритериальных подходов к оптимизации распределения воды на межхозяйственной оросительной системе показали преимущество последнего. Интегральный показатель эффективности водораспределения увеличился примерно на:

- 15 % в сравнении с вариантом оптимизации по критерию максимума площади орошения;
- 10 % по сравнению с вариантом оптимизации дохода водохозяйственной организации;
- 2 % при максимизации выручки от продажи продукции растениеводства.

При апробации подсистемы АСУ «Техническая эксплуатация» на Красногвардейской оросительной системе Республики Крым также отмечено повышение эффективности распределения ресурсов на мероприятия технической эксплуатации. Использование многокритериального экономико-математического моделирования и искусственного интеллекта для выбора первоочередных объектов ремонтно-восстановительных работ сократило возможный ущерб на 10–15 % в сравнении с однокритериальными решениями при максимизировании площади орошаемых земель, подкомандной объекту технической эксплуатации; доходности водохозяйственной организации или сокращения потерь поливной воды.

Заключение. Повышение эффективности управления водопользованием межхозяйственных оросительных систем является актуальной задачей, которая имеет большое практическое значение. Водные ресурсы становятся всё более ограниченными, а эффективное использование воды необходимо для сохранения окружающей среды и обеспечения устойчивого развития сельского хозяйства, промышленности и других отраслей экономики. В ходе работы были проведены исследования, направленные на совершенствование методов и технологий управления водными ресурсами на межхозяйственных оросительных системах.

Определены критерии, позволяющие оценить эффективность управленческих решений

в области водопользования и разработаны многокритериальная модель и алгоритмы, оптимизирующие системное распределение воды в условиях дефицита водных ресурсов с использованием методов искусственного интеллекта.

Сформированы модель оптимизации и технология распределения ограниченных финансовых ресурсов на мероприятия технической эксплуатации с использованием генетического алгоритма.

Предложена модель цифрового двойника управления водохозяйственной организацией, учитывающая интеграцию внутренних и внешних информационных потоков.

Адаптирована совокупность нейросетевых моделей, основанных на глубоких нейронных сетях, для прогнозирования урожайности.

Предложена концептуальная модель, разработано методическое обеспечение и создан прототип автоматизированной системы управления водопользованием, ориентированной на рациональные решения и интеллектуальное управление. Внедрение этих разработок позволит повысить качество управленческих воздействий, снизить нагрузку на управленцев и ускорить процесс принятия решений. Таким образом, повышение эффективности управления водопользованием межхозяйственных оросительных систем является важным шагом на пути к устойчивому развитию сельского хозяйства и сохранению водных ресурсов.

Список литературы

1. Кирейчева Л. В. Основные направления водосбережения в орошаемом земледелии России. Мелиорация и водное хозяйство. 2024;(4):79–82. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=75084289> EDN LJTZCL
2. Ольгаренко В. И., Ольгаренко И. В., Коржов И. В., Ольгаренко В. И. Принципы применения информационных технологий при организации и проведении планирования водопользования на оросительных системах. Мелиорация и гидротехника. 2024;14(3):100–115. DOI: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2024-14-3-100-115> EDN: URAPHZ
3. Исаева С. Д., Дедова Э. Б., Матвеев А. В., Бубер А. Л., Щербаков А. О., Жезмери В. Б. и др. Интеллектуальная система поддержки принятия решений для управления мелиоративно-водохозяйственным комплексом: к 100-летию Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова. М.: ВНИИ гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова, 2024. 204 с. DOI: <https://doi.org/10.37738/VNIIGIM.2024.19.62.001> EDN: ZTXNHM
4. Sharma S., Pathak B. K., Kumar R. Multi-objective Service Composition Optimization Smart Agriculture Using Fuzzy-Evolutionary Algorithm. Operations Research Forum. 2024;5:43. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43069-024-00319-7>
5. Salotagi S., Mallapur J. D. Multi-objective modified emperor penguin optimization for resource allocation in internet of things agriculture applications. Multimedia Tools and Applications. 2024;83:61139–61164. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-023-18064-0>
6. Alaimo L. S., Maggino F. Sustainable development goals indicators at territorial level: Conceptual and methodological issues – the Italian perspective. Social Indicators Research. 2020;147:383–419. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11205-019-02162-4>
7. Щедрин В. Н., Бабичев А. Н., Домашенко Ю. Е., Косиченко Ю. М., Гостищев В. Д., Монастырский В. А. и др. Ресурсы агро-мелиоративных систем: научно-практическое издание. М.: Российский НИИ информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2021. 312 с.
8. Рогачев Д. А., Юрченко И. Ф., Рогачев А. Ф. Управление системным водораспределением на основе экономико-математического моделирования и методов искусственного интеллекта. Мелиорация и гидротехника. 2023;13(3):87–106. DOI: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-87-106> EDN: YPTZVK

9. Волкова Е. А., Кудравец Д. А., Коржов В. И., Коржов И. В. Использование мобильных IT-приложений для решения задач водопользования на внутрихозяйственной оросительной сети. Мелиорация и гидротехника. 2023;13(3):30–47. DOI: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-30-47> EDN: WCHPQE

10. Мелихова Е. В., Белоусов И. С. Реализация методов искусственного интеллекта и глубоких нейронных сетей в задачах сельскохозяйственных мелиораций. Научное обоснование стратегии цифрового развития АПК и сельских территорий: мат-лы Национальной научн.-практ. конф., Волгоград, 09 ноября 2022 года. Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2023. Т. I. С. 302–307.

11. Щедрин В. Н., Васильев С. М., Слабунов В. В., Слабунова А. В., Завалин А. А. Подходы к формированию информационной системы «Цифровая мелиорация». Информационные технологии и вычислительные системы. 2020;(1):53–64. DOI: <https://doi.org/10.14357/20718632200106> EDN: FAWTUT

12. Рогачев Д. А. Оптимизация мероприятий технической эксплуатации оросительных систем методами искусственного интеллекта. Природообустройство. 2024;(4):12–19. DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-12-19> EDN: TJFYZF

References

1. Kireycheva L. V. Main directions of water saving in irrigated agriculture in Russia. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* = Melioration and Water Management. 2024;(4):79–82. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=75084289>

2. Olgarenko V. I., Olgarenko I. V., Korzhov I. V., Olgarenko V. I. Principles of using information technology in organizing and conducting water use planning in irrigation systems. *Melioratsiya i gidrotekhnika* = Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2024;14(3):100–115. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2024-14-3-100-115>

3. Isaeva S. D., Dedova E. B., Matveev A. V., Buber A. L., Shcherbakov A. O., Zhezmeri V. B. et al. Intelligent decision support system for the management of the melioration and water management complex: dedicated to the 100th anniversary of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov. Moscow: *VNI gidrotekhniki i melioratsii im. A. N. Kostyakova*, 2024. 204 p. DOI: <https://doi.org/10.37738/VNIIGIM.2024.19.62.001>

4. Sharma S., Pathak B. K., Kumar R. Multi-objective Service Composition Optimization Smart Agriculture Using Fuzzy-Evolutionary Algorithm. *Operations Research Forum*. 2024;5:43. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43069-024-00319-7>

5. Salotagi S., Mallapur J. D. Multi-objective modified emperor penguin optimization for resource allocation in internet of things agriculture applications. *Multimedia Tools and Applications*. 2024;83:61139–61164. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-023-18064-0>

6. Alaimo L. S., Maggino F. Sustainable development goals indicators at territorial level: Conceptual and methodological issues – the Italian perspective. *Social Indicators Research*. 2020;147:383–419. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11205-019-02162-4>

7. Shchedrin V. N., Babichev A. N., Domashenko Yu. E., Kosichenko Yu. M., Gostishchev V. D., Monastyrskiy V. A. et al. Resources of agro-reclamation systems: a scientific and practical publication. Moscow: *Rossiyskiy NII informatsii i tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniy po inzhenerno-tekhnicheskomu obespecheniyu agropromyshlennogo kompleksa*, 2021. 312 p.

8. Rogachev D. A., Yurchenko I. F., Rogachev A. F. System water distribution control based on economic and mathematical modeling and artificial intelligence methods. *Melioratsiya i gidrotekhnika* = Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2023;13(3):87–106. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-87-106>

9. Volkova E. A., Kudravets D. A., Korzhov V. I., Korzhov I. V. Using mobile it applications for solving water use problems in the on-farm irrigation network. *Melioratsiya i gidrotekhnika* = Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2023;13(3):30–47. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2023-13-3-30-47>

10. Melikhova E. V., Belousov I. S. Implementation of artificial intelligence methods and deep neural networks in agricultural land reclamation tasks. Scientific justification of the strategy of digital development of the agro-industrial complex and rural areas: Proceedings of the National scientific and practical conference, Volgograd, November 09, 2022. Volgograd: *Volgogradskiy GAU*, 2023. Vol. I. pp. 302–307.

11. Shchedrin V. N., Vasilyev S. M., Slabunov V. V., Slabunova A. V., Zavalin A. A. Approaches to the information system formation "Digital land reclamation". *Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy* = Information Technologies and Computing Systems. 2020;(1):53–64. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.14357/20718632200106>

12. Rogachev D. A. Optimization of measures for the technical operation of irrigation systems by artificial intelligence methods. *Prirodoobustroystvo = Prirodoobustroystvo*. 2024;(4):12–19. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-12-19>

Сведения об авторе

✉ **Рогачев Дмитрий Алексеевич**, кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела природоохранных и информационных технологий, ФГБНУ «Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации им. А. Н. Костякова», ул. Большая Академическая, д. 44, корпус 2, г. Москва, Российская Федерация, 127434, e-mail: contact@vniigim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4014-4770>, e-mail: Rogachev.soft@gmail.com

Information about the author

✉ **Dmitry A. Rogachev**, PhD in Engineering, leading researcher, the Department of Environmental Protection and Information Technologies, All-Russian Research Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A. N. Kostyakov, Bolshaya Akademicheskaya str., 44, building 2, Moscow, Russian Federation, 127434, e-mail: contact@vniigim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4014-4770>, e-mail: Rogachev.soft@gmail.com

✉ – Для контактов / Corresponding author

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.852-871>

УДК 636.082:575.174.015.3

Информационный контент полиморфизма STR-локусов в выборках быков-производителей трёх пород

© 2025. В. М. Кузнецов✉

ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», г. Киров, Российская Федерация

Данные генотипирования по 11 микросателлитным локусам (STR) производителей джерсейской (JER; $n = 10$), красной скандинавской (RED; $n = 29$) и голштинской (HOL; $n = 45$) пород использовали для расчёта информационного контента полиморфизма (PIC). По JER-выборке оценки PIC локусов были в диапазоне [0,222; 0,680], по RED-выборке – [0,448; 0,802], по HOL-выборке – [0,466; 0,825]; средние соответственно 0,470, 0,650 и 0,682. Различия среднего по JER-выборке со средними по RED- и HOL-выборкам были статистически значимыми ($p_{\text{value}} < 0,005$). Высокоинформативных локусов ($\text{PIC} > 0,6$) в JER-, RED- и HOL-выборках было 36,4, 63,6 и 72,7 % соответственно. В 2D-проекции анализа соответствия породных выборок с четырьмя категориями – первая размерность объясняла 94,5 % извлеченной инверсии, вторая – 4,5 %. На ординации проявилась близость RED- и HOL-выборок и их контраст с JER-выборкой. Также имели место близость 2-ой ($\text{PIC} = 0,4-0,6$) и 3-ей ($\text{PIC} = 0,61-0,8$) категорий, их контраст с 4-ой категорией ($\text{PIC} > 0,8$) и более значительный – с 1-ой категорией ($\text{PIC} < 0,4$). Для идентификации животных с ошибкой 0,0001 в JER-выборке было достаточно пять, в RED-выборке – четыре, в HOL-выборке – три локуса с высокими показателями PIC. При проверке происхождения, когда генотипы обоих родителей известны, вероятность исключения 99,9 % достигалась в HOL-выборке по 8 локусам, в RED-выборке – по 10, в JER-выборке требовалось более 11 локусов. В случае, когда известен генотип одного родителя, все 11 локусов в JER-, RED- и HOL-выборках могли обеспечить вероятность исключения 88,2, 98,3 и 99,1 % соответственно. Показатели индивидуальной гетерозиготности одних и тех же производителей, рассчитанные по высокоинформативным и низкоинформативным локусам, были статистически независимыми ($r^2 = 0,07$). Оценки индексов фиксации (G_{ST} , $G'_{\text{ST}(N)}$), их модификаций ($G'_{\text{ST}(H)}$, G''_{ST}) и межпородной дифференциации (D_{est} , D') RED- и HOL-выборок были: по 11 локусам – 0,056 и 0,105, 0,331 и 0,366, 0,292 и 0,343; по пяти низкоинформативным локусам (PIC_{min}) – 0,07 и 0,13, 0,292 и 0,338, 0,238 и 0,269; по пяти высокоинформативным локусам (PIC_{max}) – 0,034 и 0,066, 0,319 и 0,342, 0,295 и 0,355 соответственно. При планировании широкомасштабных популяционно-генетических исследований выбор высокоинформативных маркеров ДНК, по крайней мере, не снизит точность генетических оценок и тестов, но сократит затраты на генотипирование и анализы меньшего числа локусов.

Ключевые слова: породы КРС, STR-маркеры, генетическое разнообразие, PIC, ANOVA, сеть, вероятность идентичности, вероятность исключения, индивидуальная гетерозиготность, анализ соответствия, меры дифференциации

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (№ гос. регистрации 1021060407726-4).

Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Кузнецов В. М. Информационный контент полиморфизма STR-локусов в выборках быков-производителей трёх пород. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(4):852–871.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.852-871>

Поступила: 09.02.2025

Принята к публикации: 12.08.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

The polymorphism information content of the STR loci in the samples of breeding bulls of three breeds

© 2025. Vasily M. Kuznetsov✉

Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Kirov, Russian Federation

Genotyping data for 11 microsatellite loci (STR) of the Jersey (JER, $n = 10$), Red Scandinavian (RED, $n = 29$) and Holstein (HOL, $n = 45$) breeds were used to calculate polymorphism information content (PIC). For the JER-sample, the estimates of PIC loci were in the range of [0,222; 0,680], for the RED-sample – [0,448; 0,802], for the HOL-sample – [0,466; 0,825]; averages were 0,470, 0,650 and 0,682, respectively. The differences between the average of the JER-sample and the average of the RED- and HOL-samples were statistically significant ($p_{\text{value}} < 0,005$). Highly informative loci ($\text{PIC} > 0,6$) in the JER-, RED- and HOL-samples were 36,4, 63,6 and 72,7 %, respectively. In the 2D projection of the analysis of the correspondence of bull samples with four PIC categories, the first dimension explained 94,5 % of the extracted inversion,

the second – 4.5 %. The ordination revealed the proximity of the RED- and HOL-samples and their contrast with the JER-sample. There was also a proximity of 2 ($PIC = 0.4-0.6$) and 3 ($PIC = 0.61-0.8$) categories, their contrast with category 4 ($PIC > 0.8$) and a stronger contrast with category 1 ($PIC < 0.4$). To identify animals with an error of 0.0001, five loci with high PIC scores were sufficient in the JER-sample, four in the RED-sample, and three in the HOL-sample. When verifying the origin, when the genotypes of both parents are known, the 99.9 % probability exclusion was achieved in the HOL-sample at 8 loci, in the RED-sample at 10, and in the JER-sample more than 11 loci were required. In the case where the genotype of one parent is known, all 11 loci in the JER-, RED- and HOL-samples could provide probability exclusion of 88.2, 98.3, and 99.1 %, respectively. The indicators of individual heterozygosity of the same bulls, calculated from highly and low-informative loci, were statistically independent ($r^2 = 0.07$). Estimates of fixation indices (G_{ST} , $G'_{ST(N)}$), their modifications ($G'_{ST(H)}$, G''_{ST}) and interbreed differentiation (D_{est} , D') the RED- and HOL-samples were: for 11 loci – 0.056 and 0.105, 0.331 and 0.366, 0.292 and 0.343, respectively; for five low-information loci (PIC_{min}) – 0.07 and 0.13, 0.292 and 0.338, 0.238 and 0.269; for five high-information loci (PIC_{max}) – 0.034 and 0.066, 0.319 and 0.342, 0.295 and 0.355. When planning large-scale population-genetic studies, the choice of highly informative DNA markers will at least not reduce the accuracy of genetic assessments and tests, but will cut back the cost of genotyping and analysis of fewer loci.

Keywords: cattle breeds, STR markers, genetic diversity, Polymorphism Information Content – PIC, ANOVA, network, probability of identity, probability of exclusion, individual heterozygosity, correspondence analysis, differentiation measures

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 Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (theme No. 1021060407726-4).

The author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of Interest: the author declared no conflicts of interest.

For citations: Kuznetsov V. M. The polymorphism information content of the STR loci in the samples of breeding bulls of three breeds. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):852–871. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.852-871>

Received: 09.02.2025

Accepted for publication: 12.08.2025

Published online: 29.08.2025

Прогресс в картировании генов обеспечил генетиков и селекционеров большим числом микросателлитных маркеров (Simple Tandem Repeats, STR), ассоциированных с локусами, для которых характерна мультиаллельность. Для поиска информативных локусов, определения необходимого их числа и должного уровня полиморфизма используют два показателя: H_e – ожидаемая гетерозиготность и PIC (Polymorphism Information Content) – информационный контент полиморфизма. Оба показателя варьируют в диапазоне [0; 1] или [0; 100 %].

Ожидаемая гетерозиготность, H_e , является фундаментальной мерой генетической изменчивости в популяции, показывающая долю гетерозиготных генотипов, которая может быть при равновесии Харди-Вайнберга с теми же аллельными частотами, что и в реальной популяции [1]. Для локуса с n аллелями и частотой i -го аллели p_i

$$H_e = 1 - \sum_{i=1}^n p_i^2,$$

где $\sum_{i=1}^n p_i^2$ – это частота всех гомозиготных генотипов; считается, что гомозиготы не несут информации. М. Nei [1] назвал H_e – генным разнообразием (вероятность того, что две аллели, случайным образом извлечённые из популяции, различны или вероятность того, что любой случайно выбранный индивид

из популяции будет гетерозиготным по любым двум аллелям в маркерном локусе).

Показатель PIC предложили D. Botstein с соавторами [2] для исследования сцепления редкого доминантного заболевания, когда поражён один из родителей, который имеет гетерозиготный генотип и аллель предрасположенности к заболеванию¹. В этом контексте термин «информационный» означал – пригодный для анализа сцепления того, что маркер находится рядом с геном или другим представляющим интерес маркером. Для локуса с частотами i -го и j -го аллелей p_i и p_j :

$$PIC = 1 - (\sum_{i=1}^n p_i^2) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n 2p_i^2 p_j^2.$$

Третий элемент в правой части – это вероятность того, что оба родителя и потомок будут иметь одинаковые гетерозиготные генотипы. В сущности, PIC – это модифицированный показатель H_e с поправкой на то, что индивид при анализе сцепления не внесёт ошибки в результаты [3].

Х. Го, Р. К. Элстон (X. Guo, R. C. Elston) [4] обобщили определение PIC таким образом, чтобы оно не зависело от типа наследования изучаемого признака. Для этого они ввели понятие *информативность передачи* (transmission informativeness), под которым понимали

¹Предполагали: (а) в общей популяции частоты аллелей в маркерном локусе не зависят от частот аллелей в локусе заболевания и (б) пара аллелей встречается с частотой, равной произведению двух частот.

условную вероятность² передачи родителем одного из двух маркерных аллелей (при известных маркерных генотипах потомка и обоих родителей). Информативность передачи маркера для триады «отец-мать-потомок» в нуклеарной семье равна 0 или 1. Обобщённый показатель *PIC* – это информативность передачи, усреднённая по всем возможным триадам, т. е. безусловная вероятность того, какой маркерный аллель передал родитель. Чтобы триада была информативной для родителя, этот родитель должен быть гетерозиготным, а родители и потомок не должны иметь один и тот же гетерозиготный генотип. Х. Го, Р. К. Элстон (X. Guo, R. C. Elston) пришли к выводу, что Botstein's формула *PIC* является общей для оценивания информативности маркерного локуса, независимо от типа наследования сцеплённого признака.

Как мера полиморфизма, *PIC* зависит только от числа аллелей и частоты каждой аллели в маркерном локусе. Локусы с большим числом аллелей или/и равными аллельными частотами имеют более высокие показатели *PIC*. Они обладают большей способностью различать тестируемые образцы (высокой дискриминационной мощностью).

В литературе встречаются другие формулы расчёта *PIC*:

$$PIC = 1 - S_2 - S_2^2 + S_4, \dots \text{ где } S_k = \sum_{i=1}^n p_i^k \quad [5]$$

$$PIC = 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_i \times p_j (1 - p_i \times p_j) \quad [6]$$

$$PIC = 1 - \sum_{i=1}^n p_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n p_i^2 \right)^2 + \sum_{i=1}^n p_i^4 \quad [7]$$

$$I_2 = 2 \sum_{u=1}^{n-1} \sum_{v=u+1}^n p_u p_v - 2 \sum_{u=1}^{n-1} \sum_{v=u+1}^n p_u^2 p_v^2 \quad [8]$$

где I_2 – прогноз *PIC*; n – число аллелей; p_u и p_v – частоты маркерных аллелей u и v гетерозиготного родителя.

По Botstein's *PIC* представляет вероятность того, что данный потомок родителя, который имеет редкую аллель в индексном локусе (предрасположенность к заболеванию), позволит определить родительский генотип маркерного локуса. По [9] *PIC* – это вероятность получения потомства, для которого аллельное происхождение одного родителя может определяться по случайному спариванию. По [4] – это вероятность того, что маркерный генотип потомка позволит при отсут-

ствии кроссинговера определить, какой из двух маркерных аллелей поражённого родителя он получил, т. е. *PIC* является вероятностью получения аллели от отца или от матери. Если маркерные аллели, которые были переданы отцом и матерью, известны, или если можно определить от какого родителя потомок получил каждую аллель, то можно установить пропорцию аллелей, идентичных по происхождению (Identical by Descent, IBD). Чем выше показатель *PIC*, тем более информативен маркер и, следовательно, выше вероятность определения доли IBD-аллелей. По [7] *PIC* маркера определяется как ожидаемая доля информативного потомства у данного типа родословной. Потомство является информативным, если по его генотипу можно сделать вывод о маркерной аллели, связанной с аллелью заболевания, и, следовательно, совместно наследуемых в последующих поколениях. Полиморфизм на уровне выборки может быть предсказан по ожидаемой частоте информативных потомков в выборке (*PIC*), а полиморфизм на уровне семьи – по частоте информативных потомков на одного гетерозиготного родителя, который называют *информационным контентом семьи* (Family Information Content, *FIC*) [8]. *PIC* объединяет гетерозиготность родителей с долей потомства, для которого известно наследование маркера. Наследование неизвестно, если потомок имеет тот же маркерный генотип, что и оба родителя, или как у одного из родителей, а другой родитель неизвестен [10]. По [6] *PIC* – это способность маркера дифференцировать особей в популяции; по [11] *PIC* отражает способность специфического маркера обнаруживать полиморфизм в изучаемых образцах; по [12] *PIC* – это мера количества информации, которая может быть извлечена из генетического маркера.

Цель исследования – дать характеристику выборок быков-производителей трёх пород по информационному контенту полиморфизма STR-локусов с последующим генетико-статистическим анализом *PIC*-оценок. В частности, ставились задачи оценить взаимосвязи *PIC*-показателей с иными характеристиками разнообразия, исследовать межпородные различия, изучить вероятности идентификации генотипов и способность STR-локусов выявлять несоответствия в записях родословных.

²Условная вероятность – это вероятность наступления события А при условии, что событие В произошло. Безусловная вероятность – это вероятность события независимо от предшествующего или будущего возникновения других событий (просто вероятность наступления события).

Научная новизна – проведён сетевой анализ локусов при различных ограничениях по индексу сходства *PIC*-профилей; изучена сопряжённость породных выборок с *PIC*-категориями; исследовано влияние уровня *PIC* локусов на оценки индивидуальной гетерозиготности производителей и относительной генетической дифференциации выборок.

Материал и методы. Использовали данные генотипирования по 11 STR-локусам (*Eth3*, *inra23*, *Tgla227*, *Tgla126*, *Tgla122*, *Sps115*, *Eth225*, *Tgla53*, *Bm2113*, *Bm1824*, *Eth10*) 84 быков-производителей трёх пород³: джерсейской породы (*JER*; $n = 10$), красной скандинавской (*Viking Red*, *RED*; $n = 29$) и голштинской (*HOL*; $n = 45$)⁴. Кроме показателей H_e и *PIC* (по [2]) рассчитывали: энтропийный аналог эффективного числа аллелей на локус –

$s_{n_e} = \exp(sH)$, где sH – индекс Шеннона [13, 14]⁵; вероятности идентичности животных и исключения предполагаемого родителя(-ей); индивидуальную гетерозиготность; статистики относительной генетической дифференциации выборок: индексы фиксации (G_{ST} [16], $G'_{ST(N)}$ [1, 17]), модифицированные по [17] индексы дифференциации (индексы фиксации с поправкой на внутривыборочную гетерозиготность – $G'_{ST(H)}$ и G''_{ST}) и «подлинные» индексы дифференциации (D_{est} [18], D' [14, 19]; см. также [20, 21]). Использованы программы GenAlEx 6.502 [22, 23], PAST3 [24], STATGRAPHICS®CenturionXVI [25].

Результаты и их обсуждение. В таблице 1 даны оценки и описательная статистика показателей разнообразия s_{n_e} , H_e и *PIC* по локусам в пределах *JER*-, *RED*- и *HOL*-выборок.

Таблица 1 – Оценки s_{n_e} , H_e и *PIC* по локусам и статистика по выборкам /
Table 1 – Estimates s_{n_e} , H_e and *PIC* by loci and statistics by samples

Локус / Loci	s_{n_e}			H_e			<i>PIC</i>		
	<i>JER</i>	<i>RED</i>	<i>HOL</i>	<i>JER</i>	<i>RED</i>	<i>HOL</i>	<i>JER</i>	<i>RED</i>	<i>HOL</i>
<i>Eth3</i> (1)	1,75	4,16	3,22	0,375	0,701	0,638	0,304	0,661	0,569
<i>inra23</i> (2)	2,75	3,34	4,34	0,615	0,574	0,747	0,533	0,541	0,703
<i>Tgla227</i> (3)	3,89	6,49	6,86	0,710	0,823	0,825	0,658	0,802	0,804
<i>Tgla126</i> (4)	3,18	3,48	2,52	0,585	0,645	0,543	0,543	0,595	0,466
<i>Tgla122</i> (5)	3,58	3,87	6,23	0,690	0,659	0,815	0,639	0,618	0,792
<i>Sps115</i> (6)	1,68	2,67	3,35	0,265	0,474	0,614	0,246	0,448	0,570
<i>Eth225</i> (7)	4,12	5,69	3,91	0,725	0,791	0,681	0,680	0,761	0,627
<i>Tgla53</i> (8)	3,34	5,37	7,92	0,675	0,737	0,843	0,611	0,710	0,825
<i>Bm2113</i> (9)	1,53	5,06	5,01	0,255	0,766	0,776	0,222	0,735	0,739
<i>Bm1824</i> (10)	1,75	2,96	3,73	0,375	0,549	0,685	0,305	0,513	0,634
<i>Eth10</i> (11)	2,71	5,61	5,75	0,595	0,796	0,797	0,430	0,768	0,770
Min	1,53	2,67	2,52	0,255	0,474	0,543	0,222	0,448	0,466
Max	4,12	6,49	7,92	0,725	0,823	0,843	0,680	0,802	0,825
Range	2,59	3,82	5,40	0,470	0,349	0,300	0,458	0,354	0,359
CV, %	34,5	28,8	35,4	33,8	16,7	13,6	37,2	17,9	17,1
Mean	2,75	4,43	4,80	0,533	0,683	0,724	0,470	0,650	0,682
SE	0,287	0,384	0,513	0,054	0,034	0,030	0,053	0,035	0,035
95 % CIL	2,11	3,57	3,66	0,412	0,607	0,658	0,353	0,572	0,603
95 % CIU	3,39	5,28	5,95	0,654	0,760	0,790	0,587	0,728	0,760

Примечание: Range = Max – Min; CV – коэффициент изменчивости; Mean – среднее; SE – стандартная ошибка; 95 % CIL/95 % CIU – 95%-ный доверительный интервал (нижняя/верхняя границы) /

Notes: CV – coefficient of variability; SE – standard error; 95 % CIL/95 % CIU – 95 % confidence interval (lower/upper bounds).

³База генетических данных быков-производителей. Микросателлиты. [Электронный ресурс].

URL: <http://www.vniiplem.ru/rus/files/Database/DNK/mikrosatellity.pdf> (дата обращения: 09.12.2018).

⁴Из 33 тестов согласия распределений генотипов с равновесием Харди-Вайнберга (PXB) в двух случаях имело место статистически значимое отклонение от PXB: по локусу *Eth10* в *JER*-выборке и по локусу *Eth225* в *HOL*-выборке.

⁵Наблюдаемое число аллелей не является подходящим показателем полиморфизма маркеров [8]. Эффективное число аллелей на локус, рассчитываемое традиционным методом ($n_e = 1 / \sum_{i=1}^n p_i^2$), занижает оценку аллельного разнообразия, т. к. более распространённым аллелям придаётся больший «вес». Статистика s_{n_e} лишена этого недостатка [15].

Оценки в пределах выборок были проверены на нормальность распределения. Одномерный тест Жарке-Бера (JB)⁶ показал значения достигнутой статистической значимости (p_{value}) JB-критерия для JER-выборки в диапазоне [0,517; 0,610], для RED-выборки – [0,654; 0,670], для HOL-выборки – [0,559; 0,682]. Все значения p_{value} были больше принятого уровня критерия значимости ($\alpha = 0,05$) – данные соответствовали совокупности допущений, позволяющих применять параметрические методы статистики.

Описательная статистика дана в нижней части таблицы 1. В JER-выборке коэффициенты изменчивости (CV) оценок S_{n_e, H_e} и PIC были высокими и, примерно, равными (34–37 %). В RED- и HOL-выборках высокую изменчивость имели только S_{n_e} – оценки (28,8 и 35,4 % соответственно); оценки H_e и PIC локусов были более однородными (CV = 14–18 %).

Таблица 2 – Результаты ANOVA по PIC /
Table 2 – Results ANOVA by PIC

Источник / Source	SS	η^2 , %	DF	MS	F-test	p_{value}
Порода / Breed	0,2868	33,2	2	0,1434	12,19	0,0003
Локус / Loci	0,3420	39,6	10	0,0342	2,91	0,0202
Остаток / Residual (e)	0,2352	27,2	20	0,0118	-	-
Сумма / Total	0,8640	100,0	32	-	-	-

Примечания: SS – сумма квадратов (Type III); η^2 – вклад фактора; DF – степени свободы; MS – средний квадрат /
Notes: SS – Sum of Square (Type III); η^2 – the contribution of the factor; DF – Degrees of Freedom; MS – Mean of Square

Коэффициент детерминации статистической модели, равный 72,8 % ($p_{value} = 0,0016$), свидетельствовал о сильной (0,85) статистически значимой связи между PIC и факторами модели. Частный коэффициент детерминации по фактору «порода» 33,2 % соответствовал корреляции 0,58 («заметная»).

Среднее PIC локусов в JER-выборке статистически значимо отличалось от средних RED- и HOL-выборок (табл. 3). Различия между RED- и HOL-выборками было статистически незначимым⁸.

Относительно размаха оценок (Range) выборки распределялись: по S_{n_e} – HOL >> RED >> JER, по H_e – JER >> RED > HOL, по PIC – JER >> HOL ≈ RED (>> – существенно больше, ≈ – почти равно). Минимальные значения S_{n_e, H_e} и PIC в JER-выборке были по локусу *Bm2113*⁷, в RED-выборке – по локусу *Sps115*, в HOL-выборке – по локусу *Tgla126*; максимальные – по локусам *Eth225*, *Tgla227* и *Tgla53* соответственно.

Ожидаемая гетерозиготность локусов была выше PIC -оценок. Парные тесты Стьюдента показали в JER-выборке различие $0,063 \pm 0,0116$ при $p_{value} = 0,0003$ с 95 % CI [0,037; 0,089]. В RED-выборке – $0,033 \pm 0,0025$, $p_{value} < 0,0001$ и 95 % CI [0,027; 0,039], в HOL-выборке – $0,042 \pm 0,0058$, $p_{value} < 0,001$ и 95 % CI [0,029; 0,055] соответственно.

PIC -оценки локусов были обработаны по двухфакторной модели фиксированного типа (ANOVA): $PIC = \mu + Breed + Loci + e$ (табл. 2).

Таблица 3 – Мульти-сравнение PIC средних /
Table 3 – Multi-comparison of PIC averages

Breeds	JER-RED	JER-HOL	RED-HOL
Differences	-0,180	-0,212	-0,032
p_{value}	0,0047	0,0024	0,3829
95 % CIL	-0,297	-0,329	-0,149
95 % CIU	-0,063	-0,095	0,085

⁶Тест Jarque-Bera (Жарке-Бера, Харке-Бера) – статистический тест, проверяющий ошибки наблюдений на нормальность посредством сверки их третьего момента (асимметрия) и четвёртого момента (экспресс) с моментами нормального распределения. Если p_{value} больше принятого критического α -уровня, то нулевая гипотеза (H_0) о том, что данные получены из нормально распределённой совокупности, не может быть отвергнута.

⁷В JER-выборке слабо информативными ($PIC < 0,25$) были локусы *Bm2113* и *Sps115*.

⁸Сходный результат был по S_{n_e} и H_e переменным.

Корреляции Пирсона между показателями в пределах выборок были высокие и статистически значимые ($p_{value} < 0,0001$), именно: $S_{n_e} \times H_e - 0,94-0,96$, $S_{n_e} \times PIC - 0,95-0,98$, $H_e \times PIC - 0,980-0,998$. По объединённым данным 0,89, 0,92 и 0,99. Регрессия PIC на S_{n_e} в JER-выборке составила $0,180 \pm 0,012$, в RED-выборке была в 2 раза ниже ($0,090 \pm 0,007$), а в HOL-выборке – в 3 раза ($0,060 \pm 0,008$).

На рисунке 1 (слева) дана **лепестковая диаграмма** (radar/spiderplot) профилей выборок по PIC -оценкам локусов. Каждый локус имеет собственную ось координат. Линии соединили все значения PIC локусов (координаты) в каждой выборке и сформировали контуры. Конфигурации контуров и их площади дают наглядное

представление о структуре и уровне полиморфизма выборок. **Диаграмма удобна для сравнения** локусов в выборке, локуса в разных выборках и выборок в целом. Площадь области, ограниченная контуром JER-выборки, заметно меньше, а её конфигурация существенно отличалась от таковых RED- и HOL-выборок. Между последними эти различия были менее выражены. Тем не менее, корреляции Пирсона и Спирмена PIC -оценок локусов между выборками были статистически незначимые ($p_{value} > 0,1$).

На рисунке 1 (справа) рассеяние локусов по PIC -оценкам в пространстве JER×RED×HOL пород. Выделились две группы, близкие по PIC локусов: низкополиморфные (6, 10, 1) и высокополиморфные (2, 5, 8, 3 и 11).

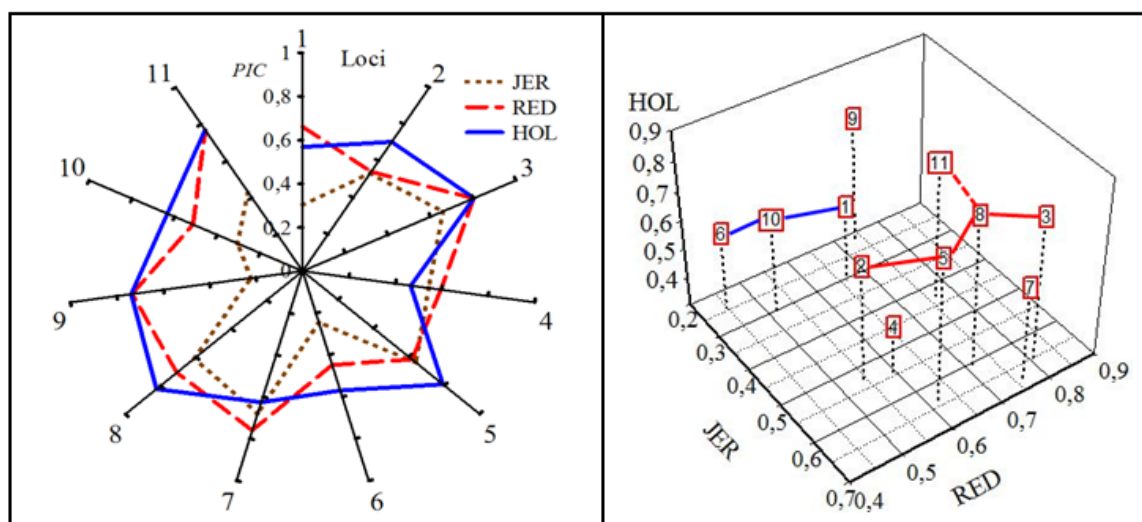


Рис. 1. 2D лепестковая диаграмма PIC -профилей выборок (слева) и рассеяние PIC -оценок локусов в 3D пространстве (справа) /

Fig. 1. 2D spider plot of PIC -profiles of samples (left) and scattering of PIC -estimates of loci in 3D space (right)

Построение сети (networkplot). По PIC -оценкам из таблицы 1 проведён сетевой анализ локусов, который базируется на теории графов. Граф – это совокупность объектов, некоторые пары которых в некотором смысле «связаны». По форме граф представляет сеть из узлов (вершин) и рёбер (граней)⁹. Преимущество сетевого анализа в том, что он придаёт значение отношениям между объектами, а не рассматривает их как изолированные.

Для компоновки сети использовался *Fruchterman-Reingold* алгоритм (FR)¹⁰, который предполагает создание графа с рёбрами одинаковой длины и минимально возможным числом пересечений. На рисунке 2 узлы в сети – это локусы, которые соединены линиями (рёбра), указывающими на наличие связи между ними. Размер (степень) узла пропорционален числу смежных ему рёбер. Узел/локус с высокой степенью является более «влиятельным»¹¹. Этот показатель позволяет дифференцировать узлы на «центральные» и «периферийные».

⁹Граф, в котором рёбра не имеют определённого направления, есть *ненаправленный*.

¹⁰Fruchterman T. M. J., Reingold E. M. Graph drawing by force-directed placement. Software: PracticeandExperience. 1991;21(11):1129–1164. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/spe.4380211102>

¹¹Узлы более значимы, если они связаны с узлами большего размера, и снижают свою значимость при контакте с узлами меньшего размера.

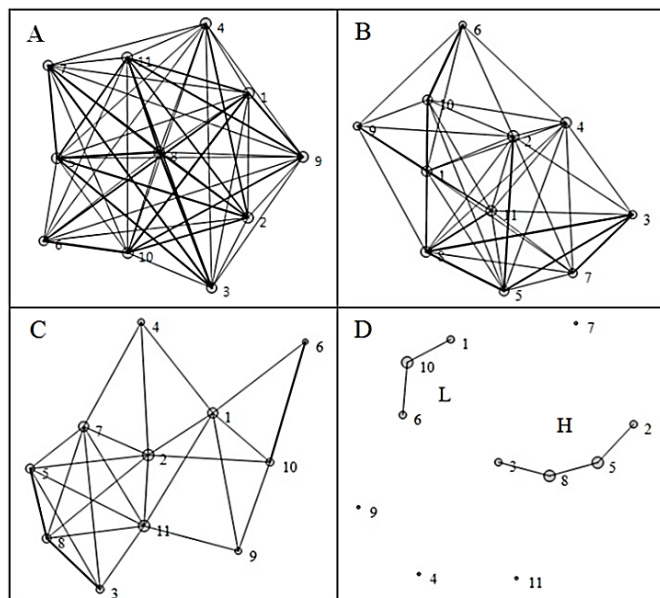


Рис. 2. Компоновка сети по евклидовому сходству (S) PIC -профилей 11 STR-локусов /
Fig. 2. Network layout based on the Euclidean similarity (S) of PIC profiles of 11 STR loci (A – $S \geq 10\%$; B – $S \geq 30\%$; C – $S \geq 50\%$; D – $S \geq 70\%$)

Ребро представляет *отношение подобия* пары локусов, которое измерялось *евклидовым сходством* (S) их профилей (PIC по JER-, RED- и HOL-выборкам). Локусы с похожими профилями (большим индексом) находятся ближе друг к другу. Жирные линии указывают на более высокое сходство. Размер узла и толщина рёбер характеризуют «экспрессию» локуса. Длина ребра определяется FR-алгоритмом только для целей визуализации и не несёт биологической информации.

Число узлов (n) является показателем порядка графа, число рёбер (m) – его размером. В графе порядка n максимальная степень каждого узла равна $n - 1$, а максимальное число рёбер – $n(n - 1) / 2$. Для 11 локусов максимальная степень каждого равна 10, а размер графа – 55.

На рисунке 2-A дан мультиграф с ограничением по индексу сходства $S \geq 10\%$ ($m = 52$). Узел 8 (центральный) и два узла наружного круга 4 и 9 имели степень 10. Все узлы внутреннего круга (1, 2, 10, 11 и 5) имели степень 9. Выделялись циклы узлов с повышенным сходством (1-6-10-1; 2-5-11-2) и цепи (3-5-2-10; 7-8-2-4). Вместе с тем, диапазон значений индекса сходства был очень широкий ($S \geq 10\%$), поэтому сеть запутанная и трудная для интерпретации¹².

Сокращение числа рёбер достигалось повышением требования к минимальному значению индекса сходства. На рисунке 2-B, C, D показана компоновка сетей с нижним порогом

сходства смежных локусов 30, 50 и 70 %¹³. В сети при условии $S \geq 30\%$ (рис. 2-B) общее число рёбер-связей сократилось до 49 со средним индексом ($\bar{S}$) 50,6 %. Локус 2 имел 10 рёбер, локусы 1, 4, 11 – по 9 рёбер. Повышенное сходство профилей имели локусы в цикле 8-3-5-8 ($\bar{S} = 75,7\%$), в цепях 1-10-6 ($\bar{S} = 74,9\%$), 7-3-5-2 ($\bar{S} = 68,0\%$) и 5-8-11 ($\bar{S} = 72,5\%$).

В сети с $S \geq 50\%$ (рис. 2-C) число межлокусных связей сократилось до 26 ($\bar{S} = 61,6\%$). Локусы 2 и 11 имели по 7 рёбер, локусы 1 и 7 – по 6, локусы 5 и 8 – по 5 рёбер. Повышенным сходством характеризовались локусы в цепях 3-8-5 ($\bar{S} = 73,6\%$) и 6-10 ($\bar{S} = 79,5\%$).

При условии $S \geq 70\%$ (рис. 2-D) осталось четыре тривиальных или нулевых графа (локусы 4, 11, 7 и 9), которые не имели связей со сходством более 70 %, и два цепных графа. Граф L составил цепь смежных локусов 6-10-1, граф H – цепь из локусов 3-8-5-2. В этих цепях «влиятельными» были локусы 5, 8 и 10. Каждый из них имел сходство профилей со смежными локусами более 70 %. Локусы 6 и 1, 3 и 2 были «висячие», т. к. имели связи только с одним локусом.

По каждому локусу L- и H-графов были рассчитаны PIC -средние [по породам]. Для локусов L-графа оценки составили 0,421, 0,484 и 0,511 ($\overline{PIC} = 0,472$), для локусов H-графа – 0,592, 0,683, 0,715 и 0,755 ($\overline{PIC} = 0,686$). Следовательно,

¹²В сетевом анализе такой граф называют «hairball» – комок шерсти.

¹³Размещение не строго определено – разные запуски программы приводят к различным конфигурациям сети.

сетевой анализ выявил кластеры локусов с низким и высоким информационным контентом полиморфизма. Отметим похожую группировку локусов по *PIC*-оценкам в 3D-графике (рис. 1, справа). Единственное отличие в том, что локус 11 отсутствовал в Н-графе. Его индексы сходства с другими локусами графа были ниже 70 % (самый высокий с локусом 8 – 64,3 %).

Анализ соответствий (Correspondence Analysis, CA). Оценки *PIC* локусов варьировали от 0,222 до 0,825 (табл. 1). В пределах каждой выборки локусам присвоили одну из четырёх категорий: 1 – полиморфизм низкий ($PIC < 40\%$); 2 – средний ($PIC = 40\text{--}60\%$); 3 – высокий/значительный ($PIC = 61\text{--}80\%$); 4 – очень высокий ($PIC > 80\%$). Распределение локусов по категориям дано в таблице 4.

Таблица 4 – Число локусов по *PIC*-категориям /
Table 4 – The number of loci by *PIC*-categories

Порода / Breed	<i>PIC</i> -категория / <i>PIC</i> -category				Σ
	1	2	3	4	
JER	4	3	4	0	11
RED	0	4	6	1	11
HOL	0	3	6	2	11
Σ	4	10	16	3	33

Примечание / Note: 1 – $PIC < 40\%$; 2 – $PIC = 40\text{--}60\%$;
3 – $PIC = 61\text{--}80\%$; 4 – $PIC > 80\%$.



В JER-выборке отсутствовали локусы категории 4, в RED- и HOL-выборках – категории 1. Самая многочисленная во всех выборках категория 3. В относительных частотах (процентах) распределение представлено мозаичным графиком (рис. 3).

На графике высота каждой строки пропорциональна её общей частоте. Ширина полос в строке пропорциональна частоте каждой ячейки в этой строке. Площадь прямоугольника («бруска») пропорциональна частоте в конкретной ячейке таблицы 4.

Если локусы 3 и 4 категорий считать высокоинформативными, то в JER-выборке их было 36,4 %, в RED- и HOL – 63,6 и 72,7 % (при равном проценте локусов третьей категории – 54,5 %).

По построению и содержанию таблица 4 относится к таблицам сопряжённости, которые являются основой для СА¹⁴. Алгоритмы СА позволяют: (а) исследовать структуру и взаимосвязь группирующих объектов (строк) и переменных (столбцов); (б) представить содержимое таблицы в виде χ^2 -дистанции между отдельными объектами или/и переменными; (с) сформировать карту соответствия (correspondence map) в пространстве низкой размерности, на которой расстояние между двумя объектами (переменными) является мерой их сходства¹⁵.

Рис. 3. Мозаичный график распределения STR-локусов по категориям *PIC* /
Fig. 3. Mosaic plot of STR loci distribution by *PIC*-categories

В СА численности каждой ячейки таблицы сопряженности (n_{ij} в табл. 4) стандартизуются ($m_{ij} = n_{ij} / \Sigma n_{ij}$), чтобы сумма по всем ячейкам была равна 1. Полученная нормированная таблица показывает, как распределена единичная

масса по ячейкам. В терминологии СА суммы относительных частот (m_{ij}) по строкам и столбцам называют массой строки и столбца соответственно (m_i и m_j).

¹⁴Развитие алгебры СА началось с 1930-х годов [26], но до 1970-х годов метод был малоизвестным. По этой причине М. О. Хилл (M. O. Hill) [27] назвал его «забытым многомерным методом».

¹⁵В СА «соответствие» является мерой того, насколько сильно частоты между строками и столбцами таблицы данных отклоняются от нулевой модели – «отсутствие ассоциации».

Если строки и столбцы таблицы независимы друг от друга, то её элементы могут быть воспроизведены по профилям строк и столбцов (ожидаемая частота: $e_{ij} = m_i \cdot m_j / \sum n_{ij}$). При гипотезе о полной независимости значений по строкам и столбцам любое отклонение от ожидаемых величин ($r_{ij} = n_{ij} - e_{ij}$) будет давать вклад в совокупную [непараметрическую] статистику χ^2 Пирсона (фиксирует степень расхождения реальных частот от ожидаемых). Рассчитанная по таблице 4 статистика χ^2 представлена в таблице 5 (дистанция хи-квадрат для клетки: $d_{ij} = r_{ij}^2 / e_{ij}$).

Таблица 5 – χ^2 -дистанции /
Table 5 – Chi-Square Distances

Порода / Breed	PIC-категория / PIC-category				Σ
	1	2	3	4	
JER	5,33	0,03	0,33	1,00	6,70
RED	1,33	0,13	0,08	0,00	1,55
HOL	1,33	0,03	0,08	1,00	2,45
Σ	8,00	0,20	0,50	2,00	10,70

Комбинированный вклад всех ячеек в строке (столбце), Σ , рассматривается как *дистанция* между наблюдаемым профилем строки (столбца) и *центроидом* всех профилей строки (столбца), где центроид – это профиль, ожидаемый в предположении независимости. Совокупная χ^2 ($\Sigma d_{ij} = 10,70$) характеризует уровень соответствия значений строк и столбцов друг другу, или степень отклонения строк и столбцов от нулевой гипотезы.

При делении значений d_{ij} на Σd_{ij} полученные величины называют *относительной инерцией* (стандартизированное хи-квадрат; табл. 6). Суммирование по строке (столбцу) дает относительную инерцию строки (столбца). Последние можно представить точками-строками (точками-столбцами) в пространстве меньшей размерности, которое удовлетворительно воспроизводит сходство (и различие) между относительными частотами для строк (столбцов) таблицы сопряженности.

Таблица 6 – Относительная инерция /
Table 6 – Relative Inertia

Порода / Breed	PIC-категория / PIC-category				Σ
	1	2	3	4	
JER	0,498	0,003	0,031	0,093	0,626
RED	0,125	0,012	0,008	0,000	0,145
HOL	0,125	0,003	0,008	0,093	0,229
Σ	0,748	0,019	0,047	0,187	1,000

Инерция характеризует *вариативность* (изменчивость) элементов таблицы сопряженности. Общая инерция алгоритмами СА разделяется на последовательные компоненты – *размерности* (dimensions), которые не коррелируют друг с другом (также употребляется термин «axis» – ось [координат]). При этом максимизируется *соответствие* между оценками строк и оценками столбцов. То есть размерности (оси) выбираются так, чтобы расстояния между строками или столбцами были максимальными и увеличение числа осей приводило бы к уменьшению доли совокупной величины χ^2 (и, следовательно, инерционности), приходящейся на каждую дополнительную ось.

Относительная инерция размерности определяет вклад каждого объекта и каждой переменной в инерцию, приходящуюся на рассматриваемую размерность. Обычно первая размерность «захватывает» максимум инерции, вторая – следующую большую величину и т. д. Достаточно 2-3 главных (principal) размерностей, чтобы представить содержимое таблицы сопряженности в виде карты соответствия. На этой карте каждый объект или/и переменная изображаются точкой(-ами), позиции которых показывают, насколько сильно они «соответствуют» друг другу. Расстояние между двумя объектами (переменными) является мерой их сходства/различия.

Ординацию объектов (переменных) интерпретируют как аппроксимацию хи-квадрат дистанций между объектами (переменными). Чем больше инерция для конкретной размерности, тем выше вариативность среди профилей, которые представляют эту размерность. Таким образом, СА – это метод декомпозиции статистики χ^2 Пирсона с целью определения пространства наименьшей размерности, позволяющего представить отклонения от ожидаемых величин.

Для анализируемых данных 2D-карты соответствия показаны на рисунке 4 (А, В, С – по главным (principal) координатам, D – по стандартизированным (standard)).

На первую размерность (Dim1) пришлось 94,5 % извлеченной инерсии, на вторую (Dim2) – 4,5 %. Пересечение двух осей – это центр тяжести [инерции] наблюдаемых точек. Удаленность точек (выборок, категорий PIC) от центра тяжести указывает на их вклады в размерности (чем дальше, тем больше вклад).

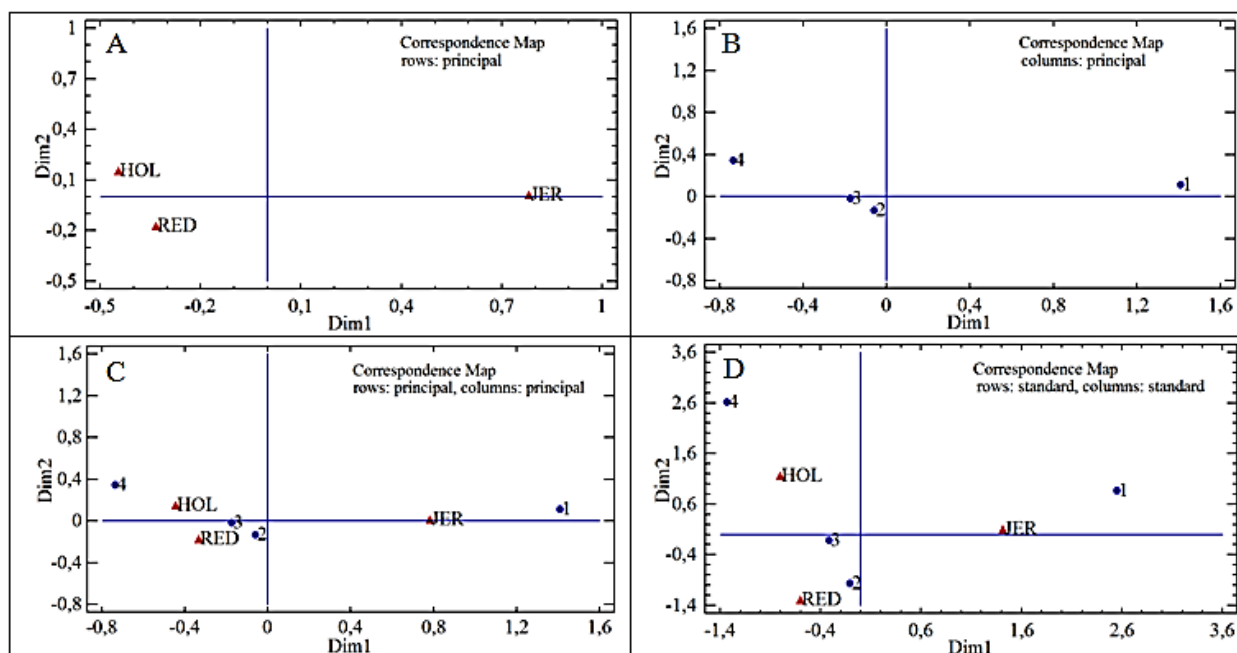


Рис. 4. 2D-карты соответствия: А – для выборок (▲); В – для категорий (●); С – биplot; D – биplot по стандартизованным координатам /

Fig. 4. 2D-correspondence maps: A – for samples (▲); B – for categories (●); C – biplot; D – biplot according to standardized coordinates

Интерпретация заключается в поиске группировок и контрастов в конфигурации проецируемых выборок и конфигурации проецируемых категорий. Расстояние/дистанция между однотипными точками (либо выборки, либо категории) характеризует их тесноту связи. Соотношение (корреляцию) между точкой (выборка, категория) и размерностью определяет угол с вершиной в центре тяжести. При остром угле – корреляция положительная, прямой угол говорит об отсутствии связи, тупой – об отрицательной корреляции.

Рисунок 4-А представляет карту соответствия породных выборок. Первая размерность отделила JER-выборку от двух других. Вторая размерность разнесла RED- и HOL-выборки: первая попала в III квадрант, вторая – во II квадрант. Характерна близость (схожесть по *PIC* профилям) RED- и HOL-выборок и их контраст с JER-выборкой. Точка «JER» находилась на значительном расстоянии от центра тяжести и, практически, лежала на горизонтальной оси. Поэтому вклад JER-выборки в инерцию Dim1 составил 66,2 %, в Dim2 – 0,4 %. Выборки RED и HOL имели более высокие вклады в Dim2 – 54,5 и 45,1 %, в Dim1 – 12,2 и 21,6 % соответственно.

Чем меньше угол между точкой-выборкой и осью, определяющей размерность, тем теснее связь между ними. Корреляция JER-выборки с Dim1 была равна +1 и нулю

с Dim2. Корреляции выборок RED и HOL с Dim1 были 0,79 и 0,89, с Dim2 – 0,21 и 0,11 соответственно. Между RED- и HOL-выборками можно полагать наличие положительной связи (острый угол с вершиной в центре тяжести) и отрицательной корреляции каждой из них с JER-выборкой (тупые углы).

Рисунок 4-В представляет 2D-карту соответствия категорий. Категории выстроились последовательно вдоль Dim1, которая отделила категорию 1 от остальных. Имели место близость 2 и 3 категорий (что указывает на сходство профилей), их контраст с категорией 4 и более значительный – с категорией 1. Категории 1 и 4 максимально не соответствовали из-за неоднородности данных в таблице сопряженности.

По горизонтальной оси точка 1 находится на значительном расстоянии от центра тяжести, но очень близка по вертикальной оси. Поэтому вклад категории 1 в инерцию Dim1 составил 78,6 %, в Dim2 – 9,2 %. На втором месте по величине вклада категория 4 – 16,2 %. Однако в Dim2 её вклад был наибольший – 62,3 %. Вклад категории 2 в Dim1 и Dim2 был соответственно 0,4 и 27,9 %, категории 3 – 4,9 и 0,6 %.

Корреляции категорий 1, 3 и 4 с Dim1 были 0,993, 0,993, 0,817 и почти нулевыми с Dim2 – 0,007, 0,007 и 0,183 соответственно.

Корреляция категории 2 с Dim1 была 0,183, с Dim2 – 0,817.

Угол между категориями 3 и 4 (через центр) был острым, что свидетельствовало о тесной положительной связи, которая объяснялась схожестью их профилей. Связности категорий 1 и 2, 2 и 3 не наблюдалось (углы практически прямые). Категории 1 и 3, 1 и 4 формировали тупые углы, указывающие на их отрицательное соотношение.

На рисунке 4-С дана комбинированная 2D-карта соответствия, представляющая всю информацию таблицы сопряженности (дистанционный биplot). Дистанции между объектами и переменными в биplotе точно не определяются. Однако небольшое расстояние указывает, примерно, на *повышенную вероятность* того, что данная переменная присутствует в данном объекте. Положения породных выборок вдоль Dim1 отражают их различия по конкретным категориям (проекция на Dim1). Выборки RED и HOL имели относительно высокие доли категорий 2 и 3, в то время как для выборки JER характерна категория 1. При этом для RED-выборки наиболее вероятны 2 и 3 категории локусов, для HOL-выборки – 3 и 4, для JER-выборки – 1 и 2 категории. Можно полагать, что имело место некоторое соответствие между расположением выборок и категорий с точки зрения их соотношения в матрице данных.

На рисунке 4-D представлен корреляционный биplot по опции «Plot standard coordinates». Опция полезна при интерпретации дистанций между строками (столбцами), координаты столбцов (строк) при этом не рассматриваются. По сравнению с картой соответствия 4-С, имела место некоторая поляризация точек-выборок и точек-категорий по Dim2, но их локализация относительно друг друга не поменялась.

Приблизительную связь между выборкой и категорией можно определить по углу с вершиной в центре тяжести. Если угол острый, то выборка и категория положительно коррелируют друг с другом. В нашем случае это означает, что JER-выборке соответствовал больший процент локусов первой категории, RED-выборке – 2 и 3 категорий, HOL-выборке – локусы категорий 3 и 4. Если угол тупой, то корреляция отрицательная (категории 3 и 4

для JER-выборки, категория 1 для RED-и HOL-выборок). Если угол прямой, то взаимосвязи нет (категория 2 для JER-выборки).

СА является исследовательским (разведочным) методом. Разработан на базе методологии, рассматривающей построение моделей с точки зрения их соответствия данным, а не наоборот [26]. Поэтому имело место мнение, что не существует тестов, которые могли бы быть использованы для проверки статистической значимости результатов СА. Однако некоторые оценки можно получить из таблицы 5. Статистика χ^2 – это наиболее простой критерий проверки значимости ассоциаций между категориальными (номинальными) переменными, не связанный с распределением последних. Тест χ^2 проверяет нуль-гипотезу (H_0): является ли классификация строк и столбцов независимой, т. е. принадлежность животных к породе не влияет на распределение STR-локусов по категориям. Рассчитанная величина χ^2 составила 10,7, а табличное значение критерия при числе степеней свободы $DF = (3 - 1)(4 - 1) = 6$ и уровне значимости $\alpha = 0,05$ было $\chi^2_{0,05; 6} = 12,59^{16}$ (больше, чем $\chi^2 = 10,7$). Также статистика *Likelihood ratio* составила 12,28 при $p_{value} = 0,056$ (больше, чем $\alpha = 0,05$). Оба теста указывали на то, что данные не противоречили модели независимости. Вместе с тем, если принять $\alpha = 0,10$, то табличное значение $\chi^2_{0,1; 6} = 10,64 < \chi^2 = 10,7$; при уровне доверия (доверности) 90 % гипотеза H_0 может быть отвергнута.

Коэффициент контингенции Чупрова, $T = \sqrt{\chi^2 / N \sqrt{DF}} = \sqrt{10,7 / 33 \sqrt{6}} = 0,36$, указывал на слабую степень зависимости между породными выборками и категориями STR-локусов. Коэффициент сопряженности Пирсона, рекомендованный в [28] для таблиц размером более чем 2×2 , составил $\phi = \sqrt{\chi^2 / N} = \sqrt{10,7 / 33} = 0,57$, что характеризовало связь как «относительно средняя». R-коэффициент Пирсона составил 0,417 ($p_{value} = 0,0158$), а τ_b -коэффициента Кендалла – 0,374 ($p_{value} = 0,0167$). Полученные оценки позволяют предположить наличие слабой, но статистически значимой связи между выборками и категориями PIC (влияния породы на распределение локусов по категориям).

¹⁶Находят по таблице критических значений χ^2 -распределения Пирсона в книгах по статистике, например: Гланц С. Медико-биологическая статистика. Электронная книга. М.: Практика. 1998. 459 с. Если $\chi^2_{0,05,DF} > \chi^2$, то H_0 принимается ($p_{value} > \alpha = 0,05$): строки и столбцы независимы.

Вероятности идентичности и исключения. Для некоторых исследований важна количественная оценка способности молекулярных маркеров распознавать разные индивиды. Эффективность идентификации оценивается вероятностью совпадения на основе данных о частотах аллелей и отношения генотипов по Харди-Вайнбергу. Наиболее часто используют *PI-статистику* (Probability Identity), которую интерпретируют как вероятность получения идентичных генотипов при определённом распределении частот аллелей¹⁷. Это может быть либо вероятность получения второго генотипа, идентичного тому, который уже есть, либо наличия в стаде животных с идентичными генотипами, либо получения двух идентичных генотипов в данной популяции. *PI-статистику* используют для сравнения потенциальной мощности различных локусов или разных наборов локусов, или для сравнения одного и того же набора локусов разных популяций, или для оценки необходимого числа локусов, обеспечивающих определённую надёж-

ность генетических тестов, или для идентификации индивидов по их гипервариабельным генетическим маркерам.

При допущении независимости аллелей и пропорций генотипов по Харди-Вайнбергу *PI* для каждого локуса (PI_L) рассчитывают по формуле: $PI_L = \sum p_i^4 + \sum (2p_i p_j)^2$, где p_i и p_j – частоты i -ой и j -ой аллели [29]¹⁸. Статистика PI_L представляет собой теоретическую вероятность идентичных генотипов локуса. Умножение PI_L на размер выборки даёт ожидаемое число животных с идентичными генотипами (Expected No. Individuals with the Same Genotype, ENISG).

Вероятность для возрастающей комбинации локусов (PI_C – мультилокусная вероятность) есть $PI_C = \prod PI_L$, где $\prod$ – оператор произведения (предполагает независимость аллелей разных локусов).

Перед расчётом PI_L , PI_C и *ENISG* (по PI_L) локусы были ранжированы по убыванию *PIC*. Ниже даны оценки по выборкам:

JER n = 10	<i>Eth225</i>	<i>Tgla227</i>	<i>Tgla122</i>	<i>Tgla53</i>	<i>Tgla126</i>	<i>inra23</i>	<i>Eth10</i>	<i>Bm1824</i>	<i>Eth3</i>	<i>Sps115</i>	<i>Bm2113</i>
PI_L	0,1200	0,1348	0,1463	0,1690	0,2131	0,2293	0,2310	0,4609	0,4609	0,5583	0,5875
ENISG	1,2	1,3	1,5	1,7	2,1	2,3	2,3	4,6	4,6	5,6	5,9
PI_C	0,1200	0,0162	0,0024	0,0004	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
RED n = 29	<i>Tgla227</i>	<i>Eth10</i>	<i>Eth225</i>	<i>Bm2113</i>	<i>Tgla53</i>	<i>Eth3</i>	<i>Tgla122</i>	<i>Tgla126</i>	<i>inra23</i>	<i>Bm1824</i>	<i>Sps115</i>
PI_L	0,0531	0,0698	0,0734	0,0862	0,0966	0,1289	0,1577	0,1757	0,2141	0,2398	0,3025
ENISG	1,5	2,0	2,1	2,5	2,8	3,7	4,6	5,1	6,2	7,0	8,8
PI_C	0,0531	0,0037	0,0003	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
HOL n = 45	<i>Tgla53</i>	<i>Tgla227</i>	<i>Tgla122</i>	<i>Eth10</i>	<i>Bm2113</i>	<i>inra23</i>	<i>Bm1824</i>	<i>Eth225</i>	<i>Sps115</i>	<i>Eth3</i>	<i>Tgla126</i>
PI_L	0,0428	0,0519	0,0577	0,0685	0,0868	0,1076	0,1497	0,1559	0,1930	0,2001	0,2862
ENISG	1,9	2,3	2,6	3,1	3,9	4,8	6,7	7,0	8,7	9,0	12,9
PI_C	0,0428	0,0022	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Вероятность совпадения генотипов возрастала со снижением *PIC* локусов. В JER-выборке значения PI_L были в диапазоне [0,12; 0,5875] со средней **0,301**, в RED-выборке – [0,0531; 0,3025] со средней **0,145**, в HOL-выборке – [0,0428; 0,2862] со средней **0,127**. Животных с идентичными генотипами [«усреднённого» локуса] можно ожидать 30,0, 14,5 и 12,7 %; в абсолютных показателях,

с учётом численности выборок, – 3, 4 и 6 голов соответственно. Из трёх локусов с *min* значениями PI_L (максимальный *PIC*) локус *Tgla227* встречался во всех выборках, локус *Eth225* – в JER- и RED-выборках, локус *Tgla122* – в JER- и HOL-выборках, локус *Eth10* – только в RED-выборке, локус *Tgla53* – только в HOL-выборке.

¹⁷Статистика *PI* показывает среднюю вероятность того, что два неродственных индивида, взятых из одной и той же популяции со случайным спариванием, случайно окажутся носителями одного и того же мультилокусного генотипа (также называют *Population Match Probability* – популяционной вероятностью совпадения).

¹⁸В GenAlEx: $PI_L = 2(\sum p_i^2)^2 - \sum p_i^4$.

PI_C -статистика (по комплексу локусов) важна при планировании исследований, требующих точной идентификации индивидов. В частности, при определении числа высокоинформативных локусов, которые необходимы для достижения разумно низкого значения PI_C (например, 0,01–0,0001). Величину $(1 - PI_C)$ называют *мощностью исключения* (Exclusion Power), или *дискриминантной мощностью* (Power of Discrimination)¹⁹. Так, при идентификации животных для достижения мощности исключения на уровне $(1 - PI_C) = 0,9999$

(99,99 %) в JER-выборке достаточна комбинация из пяти, в RED-выборке – из четырёх, в HOL-выборке – из трёх высокоинформативных локусов.

Вероятность исключения (Probability Exclusion, PE). Обычно PE -статистику определяют, как вероятность исключения особи, как родителя, на основании несоответствия её генотипа с генотипом потомка хотя бы в одном из исследуемых локусов. Для отдельного локуса в программе GenAlEx имеются три статистики [30]:

$PE1$ – вероятность исключения, когда генотип одного родителя известен (the probability of exclusion when the other parent is known)

$$PE1 = 1 - 2 \sum p_i^2 + \sum p_i^3 + 2 \sum p_i^4 - 3 \sum p_i^5 - 2(\sum p_i^2)^2 + 3 \sum p_i^2 \sum p_i^3;$$

$PE2$ – вероятность исключения, когда генотип другого родителя известен, а другого – нет (the probability of exclusion when one parent is known, but the other genotype is unavailable)

$$PE2 = 1 - 4 \sum p_i^2 + 2(\sum p_i^2)^2 + 4 \sum p_i^3 - 3 \sum p_i^4;$$

$PE3$ – вероятность исключения пары предполагаемых родителей (the probability of excluding a putative parent pair)

$$PE3 = 1 + 4 \sum p_i^4 - 4 \sum p_i^5 - 3 \sum p_i^6 - 8(\sum p_i^2)^2 + 8(\sum p_i^2)(\sum p_i^3) + 2(\sum p_i^3)^2.$$

Вероятность исключения по комбинации локусов (мультилокусная) рассчитывается как $PE_C = 1 - \prod_{i=1}^{n_{loci}} (1 - PE_i)$, где PE_i – вероятность исключения, рассчитанная для каждого локуса ($PE1$, или $PE2$, или $PE3$). Эти статистики позволяют оценить среднюю способность маркерных систем выявлять несоответствия в записях родословных.

Результаты расчёта PE по отдельным локусам визуализированы на рисунке 5-А. Наиболее высокие оценки были по $PE3$ (исключение пары предполагаемых родителей); самые низкие – по $PE2$, когда известен генотип одного родителя. Оценки $PE1$ занимали промежуточное положение.

Обращает внимание близость оценок по RED- и HOL-выборкам и низкие оценки по JER-выборке. Так, усреднённые $PE1$ были для RED- и HOL-выборок 0,4767 и 0,5054 соответственно; в среднем 0,4910, или 49,1 %. По JER-выборке эта вероятность составила 30,4 %. Соответствующие оценки по $PE2$ были 32,1 и 17,1 %, по $PE3$ – 67,2 и 44,4 %.

Максимально возможные PE по отдельному локусу в JER-, RED- и HOL-выборках: $PE1$ – 49, 65, 69 %; $PE2$ – 31, 48, 53 %; $PE3$ – 67, 83 и 86 %. Величины явно недостаточные, особенно в JER-выборке, для надёжного тестирования отцовства/материнства.

На рисунке 5 (В, С, D) представлены кумулятивные кривые PE -статистик при возрастающей комбинации локусов. В частности, на рисунке 5-В даны $PE1$ -кумуляты по выборкам. При использовании только пяти самых информативных локусов кумулятивная $PE1$ по JER-выборке была 94,09 %, по RED-выборке – 98,89 %, по HOL-выборке – 99,34 %. Дополнительные шесть локусов повысили вероятности до 98,5 (+4,41), 99,94 (+1,05) и 99,97 (+0,63) % соответственно. Для достижения совокупной $PE1$ на уровне 99,9 %²⁰ в HOL-выборке было достаточно восемь, в RED-выборке – 10 локусов, в JER-выборке необходимо более 11 локусов.

¹⁹Мощность исключения – вероятность того, что два индивида будут иметь разные генотипы.

²⁰Из 1000 потомков, соответствующих своим родителям, можно ожидать только одного ложного совпадения (случайная ошибка).

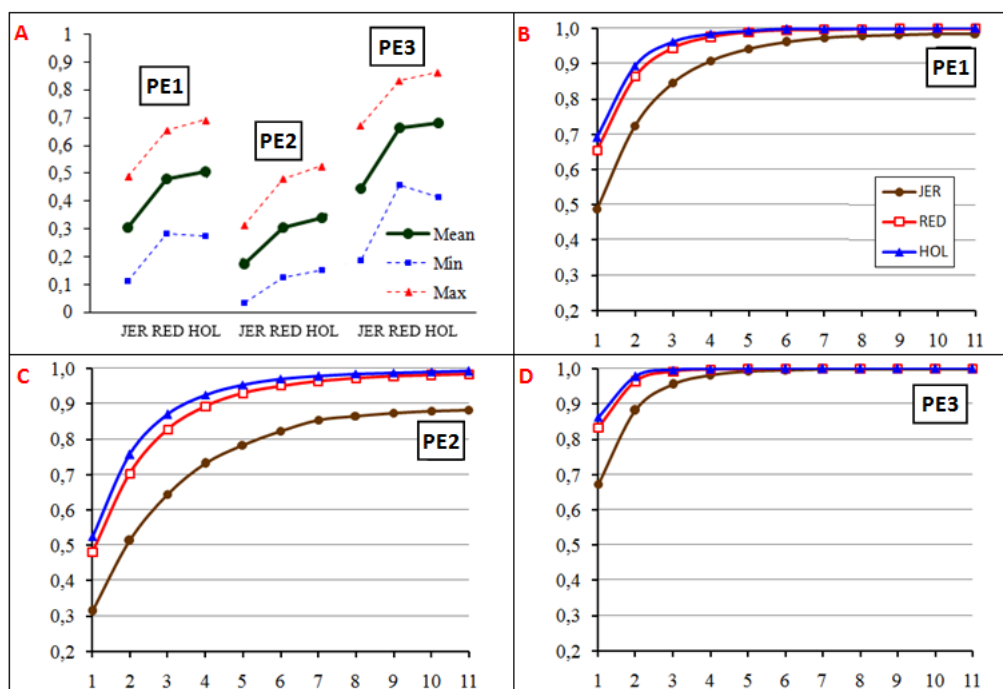


Рис. 5. Вероятности исключения: А – средние по 11 локусам с min и max значениями; В, С, D – кумулятивные для возрастающих комбинаций локусов (PE1 – когда известен генотип второго родителя; PE2 – когда генотип одного из родителей неизвестен; PE3 – когда исключаются оба предполагаемых родителя. В каждой выборке локусы были упорядочены по убыванию PIC) /

Fig. 5. Exclusion probabilities: A – the average for 11 loci with min and max values; B, C, D – cumulative for increasing combinations of loci (PE1 – when the genotype of the second parent is known; PE2 – when the genotype of one parent is unknown; PE3 – when both prospective parents are excluded. In each sample, the loci were ordered in descending order PIC)

Относительно мультилокусной PE2 (рис. 5-С; представляется более важной), то при использовании пяти локусов она была: в JER-выборке 78,19, в RED-выборке 93,08, в HOL-выборке 95,38 %. Комбинация из 11 локусов увеличила оценки PE2 до 88,26 (+10,07), 98,35 (+5,27) и 99,14 % (+3,76) соответственно. Прибавка была большей, чем в случае с PE1, но ни в одной выборке совокупная PE2 не достигла 99,9 %²¹. Ниже даны оценки кумулятивной PE2 для большего числа локусов, рассчитанные при допущении равного полиморфизма локусов (PIC из JER-выборки):

n loci →	11	15	20
PIC = 0,533	90,0	95,7	98,5
PIC = 0,611	95,4	98,5	99,6
PIC = 0,658	97,6	99,4	99,9
PIC = 0,680	98,3	99,6	99,9

Исходя из полученных результатов, для достижения в JER-выборке совокупной PE2 на уровне 99,9 % необходимо минимум

20 локусов, причём каждый из них должен иметь PIC не ниже 66 %.

При исключении обоих предполагаемых родителей, для достижения совокупной PE3 на уровне 99,9 %, в HOL-выборке было достаточно четырёх самых информативных локусов, в RED-выборке – пяти, а в JER-выборке – все 11 локусов (рис. 5-D). В случаях вольной случки или осеменения смешанной спермой, или подмены приплода PE3-тест является мощным средством идентификации кандидата в потомки.

Индивидуальная гетерозиготность.

У каждого производителя генотипы по 11 локусам были как в гетерозиготном, так и гомозиготном состоянии. Отношение числа гетерозиготных генотипов к их общему числу характеризовало индивидуальную гетерозиготность производителя (Individual Heterozygosity, H_{Ind}) [31]. Оценки H_{Ind} в JER-выборке были в диапазоне [0,273; 0,727], в RED-выборке – [0,455; 0,909] и в HOL-выборке – [0,455; 1]; средние 0,564, 0,734 и 0,814 соответственно.

²¹У речных буйволов (*Bubalus bubalis*) для достижения PE2 = 99,9 % потребовалось 11 локусов [32]. Для пород свиней крупная белая, дюрок и ландрас совокупные PE2 по 10 STR локусам были 96,4, 93 и 90,5 % соответственно [33].

По *PIC* локусов каждая выборка была разделена на две группы: «*PIC+*» – субвыборка животных с пятью высокоинформативными локусами, «*PIC-*» – с пятью низкоинформативными локусами²². В каждой субвыборке были рассчитаны новые H_{Ind} -оценки производителей, после чего данные были объединены и обрабо-

таны ANOVA по статистической модели фиксированного типа: $H_{Ind} = \mu + Breed + grPIC + e$ (табл. 7).

Влияние факторов «*Breed*» и «*grPIC*» было статистически значимым. Их суммарный вклад в общую изменчивость H_{Ind} составил 28,2 %. На фактор «*Breed*» приходилось 12,3 %²³, что указывало на низкую ($\sqrt{0,123} = 0,35$) ассоциацию с H_{Ind} .

Таблица 7 – Результаты ANOVA по H_{Ind} /

Table 7 – Results ANOVA for H_{Ind}

Source	SS	η^2 , %	DF	MS	F-test	p-value
Breed	1,292	12,3	2	0,646	14,01	<0,0001
grPIC	1,680	15,9	1	1,680	36,42	<0,0001
Residual (e)	7,564	71,8	164	0,046	-	-
Total (corrected)	10,536	100,0	167	-	-	-

Среднее H_{Ind} в JER-выборке было статистически значимо ниже, чем в RED- и HOL-выборках – их 95 % CI не перекрывались (рис. 6, слева). Различие между средними RED- и HOL-выборок было статистически незначимым.

В пределах субвыборок («*PIC+*» или «*PIC-*») 95 % CI H_{Ind} -средних не перекрывались только у производителей JER- и HOL-пород (рис. 6, справа). В пределах пород различие H_{Ind} -средних между «*PIC+*» и «*PIC-*» было, примерно, равным (в «*PIC-*» на 25 %

ниже), но в JER-выборке статистически незначимым (95 % CI перекрывались).

Корреляция Пирсона между H_{Ind} -оценкам производителей, рассчитанных по субвыборкам «*PIC+*» и «*PIC-*», была «слабой» – $r = 0,266$ ($p_{value} = 0,0143$) с 95 % CI [0,055; 0,455]; *bootstrapping* дал 95 % CI [0,115, 0,437]²⁴. Исходя из 95 % CI, максимальная повторяемость H_{Ind} -оценок не превышала 20 %. Ранговые корреляции Спирмена и Кендалла были 0,316 и 0,267 соответственно.

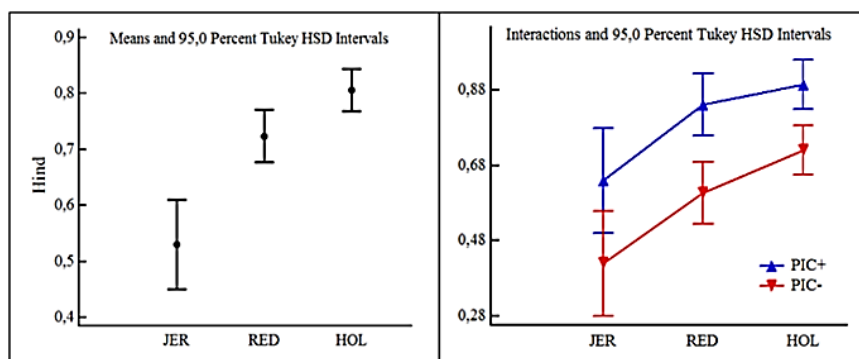


Рис. 6. LS-средние H_{Ind} с 95 % CI по выборкам (слева) и группам по *PIC* (справа) /
Fig. 6. Least Squares Means H_{Ind} and 95 % CI by samples (left) and by *PIC*-groups (right)

Влияние уровня *PIC* на оценку генетической дистанции. По RED + HOL выборке²⁵ были сформированы три субвыборки, представляющих одних и тех же производителей, но с разными наборами локусов. Субвыборка PIC_{max} включала четыре высокоинформативных локуса (*Tgla227*, *Tgla53*, *Bm2113*

и *Eth10*), субвыборка PIC_{min} – четыре низкоинформативных локуса (*Eth3*, *Tgla126*, *Sps115*, *Bm1824*) и субвыборка PIC_{mix} (смешанная) – остальные три локуса с [условно] высоким, средним и низким показателями *PIC* (*inra23*, *Tgla122* и *Eth225*).

²²Одни и те же производители, но с разными наборами локусов.

²³Аналогичный результат по однофакторной модели.

²⁴Howell D. C. Resampling Procedures. University of Vermont. Copyright 2000 (Package).

²⁵JER-выборка выпала из-за малого числа локусов с высокими показателями *PIC*.

По каждой субвыборке и исходной («Total» с 11-ю локусами) рассчитали индексы фиксации (G_{ST} , $G'_{ST(N)}$), индексы фиксации, модифицированные в индексы дифференциации ($G'_{ST(H)}$, G''_{ST}), и «подлинные» индексы дифференциации (D_{est} , D'). Оценки по Total-выборке приняли за «истинные» и использовали для расчёта MAPE (Mean Absolute Percentage Error)²⁶ – средней абсолютной процентной ошибки пары *подобных* статистик,

полученных по той или иной субвыборке. Результаты сведены в таблице 8 и визуализированы на рисунке 7.

Прежде всего следует отметить, что по Total-выборке «истинные» оценки индексов фиксации были в 3 и более раз ниже индексов дифференциации (включая модифицированные). Похожее отношение сохранялось и для оценок по трём субвыборкам.

Таблица 8 – Генетические дистанции RED-HOL, рассчитанные по субвыборкам с разным уровнем PIC локусов шестью методами /

Table 8 – Genetic distances between RED and HOL, calculated from subsamples with different levels of PIC loci using six methods

Мера / Measure → Вариант / Variant ↓	Fixation indices		Modified indices		Differentiation indices	
	G_{ST}	$G'_{ST(N)}$	$G'_{ST(H)}$	G''_{ST}	D_{est}	D'
Total (11 locus)	0,056	0,105	0,331	0,366	0,292	0,343
PIC_{max} (4 locus)	0,034	0,066	0,319	0,342	0,295	0,355
PIC _{min} (4 locus)	0,070	0,130	0,292	0,338	0,238	0,269
PIC _{mix} (3 locus)	0,070	0,131	0,430	0,468	0,388	0,421
MAPE (PIC _{max}), %	38,2		5,1		2,3	
MAPE (PIC _{min}), %	24,4		9,7		20,0	
MAPE (PIC _{mix}), %	24,9		28,9		27,8	

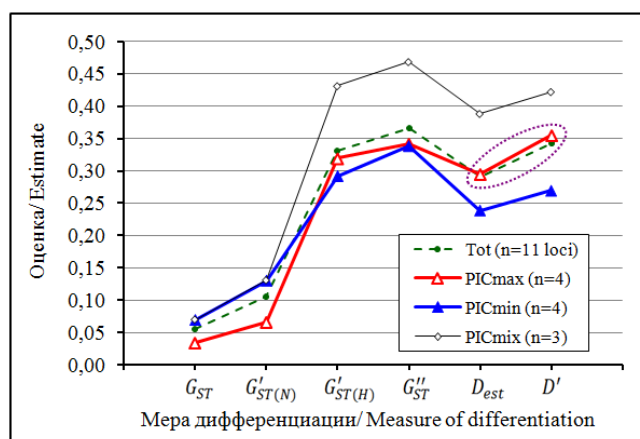


Рис. 7. Оценки генетической дистанции RED-HOL на выборках с разным уровнем PIC локусов /

Fig. 7. Estimates of the RED-HOL genetic distance in samples with different levels of PIC loci

Абсолютное расхождение оценок, рассчитанных по субвыборкам PIC_{max} и PIC_{min}, для индексов фиксации было в среднем 0,05, для модифицированных индексов – 0,016, для «подлинных» индексов дифференциации – 0,072. Оценки индексов фиксации по PIC_{max}-субвыборке были в 2 раза *ниже*, чем по PIC_{min}-субвыборке. В то время как оценки индексов дифференциации по PIC_{max}-субвыборке были *выше* таковых по PIC_{min}-субвыборке на 16,6 %. При этом оценки по $G'_{ST(H)}$

и G''_{ST} мерам были выше на 5,2 %, а по D_{est} и D' мерам – на 28 %.

Интересно, что индексы дифференциации, рассчитанные по PIC_{mix}-субвыборке (смешанной), были на 19–63 % выше, чем аналогичные индексы по другим субвыборкам. Как представляется, это могло быть следствием неоднородности локусов по оценкам (точнее, по числу [и частоте] аллелей). Однако неоднородность данных не влияла на индексы фиксации, так как оценки, рассчитанные по PIC_{mix} и PIC_{min} субвыборкам, совпадали.

²⁶MAPE = (100 × Σ|e_i|/θ*)/n, где e_i = θ_i - θ*; θ_i – i-ая оценка, θ* – «истинная» оценка.

Индексы фиксации, рассчитанные по трём субвыборкам, имели MAPE 24–38 %. Оценки индексов дифференциации по субвыборке PIC_{max} имели самые малые MAPE – в среднем 3,7 % (по субвыборке PIC_{min} – 10–20 %). При использовании субвыборки PIC_{mix} оценки индексов фиксации и дифференциации имели MAPE на уровне 25–29 %.

В целом, уровень PIC локусов влиял на оценки относительной генетической дифференциации выборок. Ближе к «истинным» были оценки, полученные по субвыборке с четырьмя высокоинформативными локусами мерами D_{est} , D' (MAPE = 2,3 %), и $G'_{ST(H)}$, G''_{ST} (MAPE = 5,1 %). В остальных вариантах MAPE были >10%, что можно интерпретировать как статистически значимое отклонение от «истинных» оценок.

Заключение. Породы анализируемых выборок производителей имели разную историю. Так, джерсейская порода разводилась на острове Джерси в изоляции 2,5 века (1763–2008 гг.). Обмен генетическим материалом между финской айрширской, красной датской и краснопёстрой шведской породами, продолжавшийся в течение многих лет, способствовал получению потомства различной кровности, смешиванию генофондов и, как следствие, объединению (2010 г.) в популяцию Viking Red – красную скандинавскую породу. Начавшаяся в 70-х годах XX столетия экспансия голштинской породы Северной Америки в европейские, а затем и в другие страны мира, сделали её трансграничной²⁷. Рассматриваемая HOL-выборка включала данные по голштинским производителям североамериканской, голландской и немецкой селекции. Особенности разведения (в JER-породе – инбридинг, в RED – трёхпородное скрещивание+селекция, в HOL – поплотительное скрещивание+селекция) сформировали генофонды пород, отличающиеся по показателям аллельного и генного разнообразия. Самыми низкими они были в JER-выборке, самыми высокими – в HOL-выборке. Так, по JER-выборке число эффективных аллелей на локус (S_{ne}) было 2,7, в RED-выборке – 4,4 и в HOL-выборке – 4,8; ожидаемая гетерозиготность (H_e) соответственно 0,533, 0,683 и 0,724, информационный контент полиморфизма (PIC) – 0,470, 0,650, 0,682, причём оценки были статистически значимо ниже H_e -оценок. Средние S_{ne} , H_e и PIC показатели

по JER-выборке статистически значимо отличались от таковых в RED и HOL выборках. Между последними статистически значимых различий не наблюдалось (по всей вероятности, вследствие кроссбридинга как при слиянии, так и при поглощении пород). В пределах породных выборок имела место сильная взаимосвязь PIC -оценок с оценками S_{ne} и H_e (0,940–0,998). В то же время, корреляции PIC -оценок локусов между породными выборками были статистически незначимые.

PIC -оценки в JER-выборке имели высокую изменчивость ($CV = 37$ %); выборки RED и HOL были более гомогенными ($CV = 17$ %). Локусов с $PIC > 0,6$ в JER-выборке, примерно в 2 раза меньше, чем в RED- и HOL-выборках (36,4, 63,6 и 72,7 %), что характеризовало последние как генетически высокополиморфные. Из трёх локусов с тах PIC локус $Tgla227$ встречался во всех выборках, локус $Eth225$ – в JER- и RED-выборках, локус $Tgla122$ – в JER- и HOL-выборках, локус $Eth10$ – только в выборке RED, локус $Tgla53$ – только в выборке HOL. Сетевой анализ с ограничением для индекса сходства локусов $S \geq 50$ % сформировал граф размером 26 межлокусных связей ($\bar{S} = 61,6$ %) из 55 возможных ($\bar{S} = 47,6$ %). Локусы 1, 2, 5, 7, 8 и 11 имели по 5–7 связей («влиятельные»). Повышенные индексы сходства были в цепях 3-8-5 и 6-10 (≈ 80 %). При условии $S \geq 70$ % компоновка сети включала четыре нулевых графа (локусы 4, 11, 7 и 9) и два цепных 6-10-1 и 3-8-5-2. Первый граф объединил низкополиморфные локусы с $\overline{PIC} = 0,472$, второй – высокополиморфные с $\overline{PIC} = 0,686$. Сходную группировку наблюдали в трёхмерном (JER×RED×HOL) графике рассеяния локусов по PIC .

Близость выборок RED и HOL и их контраст с JER-выборкой наглядно демонстрировала 2D-карта соответствия (CA-анализ). Имела место некоторая сопряжённость между ординациями выборок и категорий (1 категория – $PIC < 40$ %; 2 – $PIC = 40–60$ %; 3 – $PIC = 61–80$ %; 4 – $PIC > 80$ %). Гипотеза о независимости принималась при $\alpha = 0,05$ и отклонялась при $\alpha = 0,1$ (тесты χ^2 и *Likelihood ratio*). Статистически значимые оценки корреляций Пирсона и Кендалла ($\approx 0,4$) позволили предположить наличие слабой ассоциации между породой производителя и PIC -категорией.

²⁷Порода, которая разводится в нескольких странах и регионах (международная) или в нескольких странах, но внутри одного региона (региональная).

Оценки индивидуальной гетерозиготности производителей (H_{Ind}) варьировали от 0,273 до 0,727 в JER-выборке, от 0,455 до 0,909 в RED-выборке и от 0,455 до 1 в HOL-выборке при средних 0,564, 0,734 и 0,814 соответственно. Влияние породной принадлежности и групп с высоким и низким полиморфизмом локусов на изменчивость H_{Ind} было статистически значимым и, примерно, равным (12,3 и 15,9 %). Средние H_{Ind} по породам в субвыборке «PIC-» были на ~25 % ниже, но различие в JER-породе статистически незначимо. Взаимосвязь H_{Ind} -оценок одних и тех же производителей, рассчитанных по высокоинформативным и низкоинформативным локусам, была «слабой»; максимальная повторяемость H_{Ind} -оценок не превышала 20 %.

Уровень PIC локусов влиял на оценку относительной генетической дифференциации RED- и HOL-выборок. Полученные результаты в целом соответствовали теоретическим разработкам, демонстрирующим, что при анализе мультиаллельных маркеров повышенный уровень гетерозиготности в пределах популяций занижает оценки межпопуляционного разнообразия, измеряемого индексами фиксации [18, 34; см. также 20, 21]. В то же время заниженные оценки генетической дифференциации «правильными» методами по PIC_{min} -выборке (низкоинформативные локусы) сигнализировали о том, что использование ДНК-маркеров с малой аллельностью (например, SNP) может привести к ошибочным заключениям. Аналогично и при использовании локусов, неоднородных по PIC. По всей вероятности, использование в популяционно-генетических исследованиях высоко-

информативных ДНК-маркеров совместно с D_{est} и D' мерами должно способствовать получению объективных оценок относительной генетической дифференциации популяций.

Как представляется, при идентификации происхождения животных на базе STR-локусов могут быть полезны разведочные исследования по (1) оцениванию PIC локусов тестируемой выборки и (2) анализу необходимого числа локусов, которые обеспечили бы требуемую вероятность исключения предполагаемого родителя(-ей). Во всяком случае, результаты, полученные по данным JER- и RED-выборкам, свидетельствовали о том, что для тестирования отцовства/материнства с совокупной $PE2 = 99,9$ % [известен генотип одного родителя] имеющихся 11 локусов было недостаточно. В общем, вероятность исключения 99,9 % может быть обеспечена с меньшим числом локусов, если для PIC устанавливать ограничение, например, не ниже 60 %.

Итак, выявляя и выбирая высокоинформативные STR-локусы [и ДНК-маркеры] можно повысить надежность тестов и генетических оценок, снизить вероятность ошибок при индивидуальной, породной и видовой идентификации, оценке родства, а также исключить риски при проверке происхождения животных. Такой подход будет способствовать сокращению числа необходимых локусов и, соответственно, затрат при проведении масштабных популяционно-генетических исследований. Существует мнение, что инвестиции в поиск высокоинформативных локусов могут быть экономически выгодными в долгосрочной перспективе [35].

References

1. Nei M. Analysis of gene diversity in subdivided populations. Proceedings of the National Academy of Sciences. 1973;70(12):3321–3323. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.70.12.3321>
2. Botstein D., White R. L., Skolnick M., Davis R. W. Construction of a genetic linkage map in man using restriction fragment length polymorphisms. American Journal of Human Genetics. 1980;32(3):314–331. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6247908/>
3. Speer M. J. Genetic linkage: concepts and methods. In: Albers MJ (ed) Genetics of cerebrovascular disease. Blackwell, Oxford, 1999. pp. 25–26.
4. Guo X., Elston R. C. Linkage informative content of polymorphic genetic markers. Human Heredity. 1999;49(2):112–118. DOI: <https://doi.org/10.1159/000022855>
5. Yasuda N. HLA Polymorphism Information Content (PIC). Japanese journal of human genetics. 1988;33(3):385–387. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02032870>
6. Chakravarti A. Information content of the Centred Etude du Polymorphisme Humain (CEPH) family structures for linkage studies. Human Genetics. 1991;87:721–724. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00201732>
7. Hildebrand C. E., Torney D. C., Wagner R. P. Informativeness of polymorphic DNA markers. In: Mapping the Genome/Informativeness of Polymorphic DNA Markers. Los Alamos Science. 1992;20:100–102. URL: <https://sgp.fas.org/othergov/doe/lanl/pubs/00326695.pdf>

8. Da Y., VanRaden P. M., Ron M., Beever J. E., Paszek A. A., Song J. et al. Standardization and conversion of marker polymorphism measures. *Animal Biotechnology*. 1999;10(1-2):25–35.
DOI: <https://doi.org/10.1080/10495399909525919>
9. Веллер Д. И. Геномная селекция животных. СПб.: Проспект Науки, 2018. 208 с.
Weller J. I. Genomic breeding of animals. Saint-Petersburg: *Prospekt Nauki*, 2018. 208 p.
10. Höschele I. Mapping quantitative trait loci in outbred pedigrees. In: *Handbook of Statistical Genetics*, Third Edition. Edited by D. J. Balding, M. Bishop and C. Cannings. John Wiley & Sons, Ltd. 2007. pp. 623–677.
11. Gilbert J. E., Lewis R. V., Wilkinson M. J., Caligari P. D. S. Developing an appropriate strategy to assess genetic variability in plant germplasm collections. *Theoretical and Applied Genetics*. 1999;98(6-7):1125–1131.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s001220051176>
12. Столповский Ю. А., Бабаян О. В., Каштанов С. Н., Пискунов А. К., Сёмина М. Т., Холодова М. В. и др. Генетическая оценка пород северного оленя (*Rangifer tarandus*) и их дикого предка с помощью новой панели STR-маркеров. *Генетика*. 2020;56(12):1410–1426. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0016675820120139> EDN: YCPKAN
- Stolpovskiy Yu. A., Babayan O. V., Kashtanov S. N., Piskunov A. K., Se-mina M. T., Kholodova M. V. et al. Genetic evaluation of the breeds of reindeer (*Rangifer tarandus*) and their wild ancestor using a new panel of STR markers. *Genetika* = Russian Journal of Genetics. 2020;56(12):1410–1426. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.31857/S0016675820120139>
13. Shannon C. E. A mathematical theory of communication. reprinted with corrections from. *The Bell System Technical Journal*. 1948;27(3):379–423, 623–656.
URL: <https://people.math.harvard.edu/~ctm/home/text/others/shannon/entropy/entropy.pdf>
14. Sherwin W. B. Entropy and information approaches to genetic diversity and its expression: Genomic geography. *Entropy*. 2010;12(7):1765–1798. DOI: <https://doi.org/10.3390/e12071765>
15. Jost L. Partitioning diversity into independent alpha and beta components. *Ecology*. 2007;88(10):2427–2439.
DOI: <https://doi.org/10.1890/06-1736.1>
16. Hartl D. E., Clark A. G. *Principles of population genetics*. 3rd Ed. Sinauer Associates. Sunderland, Mass. 1997. 543 p.
17. Meirmans P. G., Hedrick P. W. Assessing population structure: F_{ST} and related measures. *Molecular Ecology Resources*. 2011;11(1):5–18. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1755-0998.2010.02927.x>
18. Jost L. G_{ST} and its relatives do not measure differentiation. *Molecular Ecology*. 2008;17(18):4015–4026.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2008.03887.x>
19. Smouse P. E., Banks S. C., Peakall R. Converting quadratic entropy to diversity: Both animals and alleles are diverse, but some are more diverse than others. *PLoS ONE*. 2017;12(10):e0185499.
DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185499>
20. Кузнецов В. М. Сравнение методов оценки генетической дифференциации популяций по микросателлитным маркерам. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2020;21(2):169–182.
DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.2.169-182> EDN: FYQNTTE
- Kuznetsov V. M. Comparison of methods for evaluating genetic differentiation of populations by microsatellite markers. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2020;21(2):169–182. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.2.169-182>
21. Кузнецов В. М. Информационно-энтропийный подход к анализу генетического разнообразия популяций. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2022;23(2):159–173.
DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.2.159-173> EDN: LSSUYZ
- Kuznetsov V. M. Information-entropy approach to the analysis of genetic diversity of populations (analytical review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2022;23(2):159–173. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.2.159-173>
22. Peakall R., Smouse P. E. GENALEX 6: genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research. *Molecular Ecology Notes*. 2006;6(1):288–295.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2005.01155.x>
23. Peakall R., Smouse P. E. GenAlEx 6.5: Genetic analysis in Excel. Population genetic software for teaching and research – an update. *Bioinformatics*. 2012;28(19):2537–2539. DOI: <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bts460>
24. Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*. 2001;4(1):1–9.
URL: https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf
25. STATGRAPHICS® Centurion XVI User Manual. By StatPoint Technologies, Inc. 2010. 297p.
26. Greenacre M. J. *Theory and applications of correspondence analysis*. London: Academic Press, 1984. 364 p.
27. Hill M. O. Correspondence analysis: a neglected multivariate method. *Appl. Statist.* 1974;23(3):340–354.
DOI: <https://doi.org/10.2307/2347127>

28. Хромов-Борисов Н. Н. Корректный статистический анализ частот генотипов по генам семейств UCP и PPAR в группе жителей блокадного Ленинграда и контрольной группе. Успехи геронтологии. 2016;29(3):454–460. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26744152> EDN: WNGHOH

Khromov-Borisov N. N. correct statistical analysis of genotype frequencies for UCP and PPAR gene families in residents of besieged Leningrad and the control group. *Uspekhi gerontologii*. 2016;29(3):454–460. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26744152>

29. Paetkau D., Strobeck C. Microsatellite analysis of genetic variation in black bear populations. *Molecular Ecology*. 1994;3(5):489–495. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-294x.1994.tb00127.x>

30. Jamieson A., Taylor S. C. Comparisons of three probability formulae for parentage exclusion. *Animal Genetics*. 1997;28(6):397–400. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2052.1997.00186.x>

31. Waits L. P., Luikart G., Taberlet P. Estimating the probability of identity among genotypes in natural populations: cautions and guidelines. *Molecular Ecology*. 2001;10(1):249–256. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-294x.2001.01185.x>

32. Kathiravan P., Kataria R. S., Mishra B. P. Power of exclusion of 19 microsatellite markers for parentage testing in river buffalo (*Bubalus bubalis*). *Molecular Biology Reports*. 2012;39(8):8217–8223. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11033-012-1669-x>

33. Харзинова В. Р., Костюнина О. В., Карпушкина Т. В., Зиновьева Н. А. Способ определения достоверности происхождения и чистопородности свиней: пат. №2744733 Российская Федерация. №2019142089: заявл. 18.12.2019; опублик. 15.03.2021. Бюл. № 8. 19 с.

Режим доступа: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet

Kharzinova V. R., Kostyunina O. V., Karpushkina T. V., Zinoveva N. A. Method for determination of origin and genuineness of strain of pigs: Patent RF, no.2744733, 2021.

URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet

34. Hedrick P. W. Perspective: Highly variable loci and their interpretation in evolution and conservation. *Evolution*. 1999;53(2):313–318. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1999.tb03767.x>

35. Lynch M., Ritland K. Estimation of pairwise relatedness with molecular markers. *Genetics*. 1999;152(4):1753–1766. DOI: <https://doi.org/10.1093/genetics/152.4.1753>

Сведения об авторе

✉ Кузнецов Василий Михайлович, доктор с.-х. наук, профессор, зав. лабораторией популяционной генетики в животноводстве, 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/0000-0002-2219-805X>, e-mail: vm-kuznetsov@mail.ru

Information about the author

✉ Vasily M. Kuznetsov, DSc in Agricultural Science, professor, Head of the Laboratory of Population Genetics in Animal Husbandry, 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/0000-0002-2219-805X>, e-mail: vm-kuznetsov@mail.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author



Влияние сроков откорма на метаболиты крови свиней породы ландрас и их двухпородных гибридов

© 2025. Н. С. Колесник, О. Н. Сивкина, О. А. Воронина ✉, А. А. Савина, С. Ю. Зайцев

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста», пос. Дубровицы, Московская область, Российская Федерация

Проведён сравнительный межгрупповой анализ свиней на откорме разных породных и возрастных групп по биохимическим и аминокислотным показателям сыворотки крови. При формировании групп по принципу аналогов было отобрано по 10 голов животных в каждой группе: 1 – ландрас 60–65 дней откорма; 2 – ландрас × крупная белая 60–65 дней откорма; 3 – ландрас 100–110 дней откорма; 4 – ландрас × крупная белая 100–110 дней откорма. Парные межгрупповые сравнения выполнены после проверки распределения данных по критерию Шапиро-Уилка и оценки однородности дисперсии по тесту Левена. Однофакторный дисперсионный анализ и тест Тьюки-Крамера применяли для данных, где распределение соответствует нормальному и подтверждается условие однородности дисперсии в группах. При несоблюдении одного из двух условий сравнительный анализ выполнен по критерию Краскела-Уоллиса с поправкой Бонферрони в сочетании с тестом Манна-Уитни. Не установлено статистически значимых различий в группах 1 и 2. С возрастом, для групп 3 и 4 установлены значимые различия только для аминокислот – метионина и валина. У свиней породы ландрас на 100–110-ый день откорма (группа 3) достоверно выше содержание следующих аминокислот в крови: аспарагиновой кислоты ($p = 0,014$), глутаминовой кислоты ($p = 0,042$), изолейцина ($p = 0,035$), цистеина ($p = 0,003$), аланина ($p = 0,035$), серина ($p = 0,013$), валина ($p = 0,006$), аргинина ($p = 0,001$) в сравнении с животными 1 группы; тогда как средние значения по показателю метионина ниже ($p = 0,008$). У гибридов ландрас × крупная белая на 100–110-ый день откорма (группа 4) выше содержание общего белка ($p = 0,015$), альбуминов ($p < 0,001$), мочевины ($p = 0,008$), аспарагиновой кислоты ($p < 0,001$), аланина ($p < 0,001$), изолейцина ($p = 0,003$), лизина ($p = 0,001$), цистеина ($p = 0,002$), валина ($p < 0,001$), аргинина ($p < 0,001$), ниже пролина ($p = 0,028$) и метионина ($p < 0,001$), серина ($p < 0,001$), глицина ($p = 0,003$) в сравнении с животными 2 группы. Таким образом, на изменение биохимических показателей и аминокислотного состава крови свиней большее влияние оказывают возрастные динамики, которые ярче проявлены у гибридов в сравнении с чистой породой.

Ключевые слова: свиноводство, возрастная динамика, метаболические изменения, обусловленные селекцией

Благодарности: работа по разделам «Введение», пунктам 1 и 2 раздела «Результаты и обсуждения» выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант №20-16-00032-П (соглашение №20-16-00032-П от 15.05.2023 г.) <https://rscf.ru/project/20-16-00032/>. Работа по разделам «Материалы и методы» и пункта 3 «Результаты и обсуждения» выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста» (тема № FGGN-2024-0016).

Авторы благодарят Р. А. Рыкова за техническую помощь в измерениях биохимических показателей.

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Колесник Н. С., Сивкина О. Н., Воронина О. А., Савина А. А., Зайцев С. Ю. Влияние сроков откорма на метаболиты крови свиней породы ландрас и их двухпородных гибридов. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(4):872–884. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.4.872-884>

Поступила: 03.10.2024

Принята к публикации: 03.07.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

The effect of fattening periods on blood metabolites of Landrace pigs and their two-breed hybrids

© 2025. Nikita S. Kolesnik, Olga N. Sivkina, Oksana A. Voronina ✉, Anastasia A. Savina, Sergey Yu. Zaytsev

Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L. K. Ernst, pos. Dubrovitsy, Moscow region, Russian Federation

A comparative intergroup analysis of fattening pigs of different breed and age groups according to biochemical and amino acid parameters of blood serum was carried out. When forming groups based on the principle of analogues, $n = 10$ heads of animals were selected in each group: 1 – Landrace 60–65 days of fattening; 2 – Landrace x Large White 60–65 days of fattening; 3 – Landrace 100–110 days of fattening; 4 – Landrace x Large White 100–110 days of fattening. Pairwise intergroup comparisons were performed after checking the distribution of data according to the Shapiro-Wilk criterion and evaluating the uniformity of variance using the Levene's test. Univariate variance analysis and the Tukey-Kramer test were used for data where the distribution corresponded to normal, and the condition of uniformity of variance in groups was confirmed. If one of the two conditions is not met, the comparative analysis is performed using the Kruskal-Wallis test with the Bonferroni

correction, in combination with the Mann-Whitney test. No statistically significant differences were found in groups 1 and 2. With age, for groups 3 and 4, significant differences were found only for amino acids – methionine and valine. in Landrace breed (group 3) on the 100-110th day of fattening the content of the following amino acids in the blood was significantly higher: aspartic acid ($p = 0.014$), glutamic acid ($p = 0.042$), isoleucine ($p = 0.035$), cysteine ($p = 0.003$), alanine ($p = 0.035$), serine ($p = 0.013$), valine ($p = 0.006$), arginine ($p = 0.001$) in comparison with the animals of the 1 group; whereas the average values for the methionine index were lower ($p = 0.008$). In Landrace x Large White hybrids (group 4) on the 100-110th day of fattening the content of total protein ($p = 0.015$), albumins ($p < 0.001$), urea ($p = 0.008$), aspartic acid ($p < 0.001$), alanine ($p < 0.001$), isoleucine ($p = 0.003$), lysine ($p = 0.001$), cysteine ($p = 0.002$), valine ($p < 0.001$), arginine ($p < 0.001$) was higher while the content of proline ($p = 0.028$) and methionine ($p < 0.001$), serine ($p < 0.001$), glycine ($p = 0.003$) was lower in comparison with the animals of the 2 group. Thus, the change in biochemical parameters and amino acid composition of pig blood is mostly influenced by age dynamics that is more vividly manifested in hybrids compared with the pure breed.

Keywords: pig breeding, age dynamics, metabolic changes caused by breeding

Acknowledgements: the work in the section “Introduction” and paragraphs 1 and 2 of the section “Results and Discussion” was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, grant No. 20-16-00032-P (agreement No. 20-16-00032-P dated 05/15/2023) <https://rscf.ru/project/20-16-00032/>. The work in the section “Materials and Methods” and paragraph 3 of the section “Results and Discussion” 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 Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L. K. Ernst (topic No. FGGN-2024-0016).

The authors thank R. A. Rykov for technical assistance in measuring the biochemical parameters.

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: Kolesnik N. S., Sivkina O. N., Voronina O. A., Savina A. A., Zaytsev S. Yu. The effect of fattening periods on blood metabolites of Landrace pigs and their two-breed hybrids. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(4):872–884. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.4.872-884>

Received: 03.10.2024

Accepted for publication: 03.07.2025

Published online: 29.08.2025

Возрастные и породные различия в биохимических показателях и аминокислотном составе крови свиней – важный предмет изучения. Они отражают интенсивность обменных процессов во время роста, указывают на тонкости в организации метаболизма. Так, аминокислоты (АК) выполняют целый ряд функций, выступая в качестве строительных блоков для белков, основными источниками энергии для слизистой оболочки кишечника, лимитирующими компонентами ключевых белков кишечного барьера (окклюдин, клаудины и т. д.), выполняют функцию регулятора иммунных и окислительных реакций. Например, треонин наиболее распространённая незаменимая АК в муцинах, которые обеспечивают барьерную функцию эпителия [1, 2], нарушение которой особенно опасно для поросят во время отъема, сопряжено с риском возникновения диареи [1] и повлечет за собой изменение в биохимических показателях крови. Глицин, глутамат и цистеин составляют важнейший трипептид в процессах регуляции окислительного стресса. Избыток АК в клетках напрямую модулирует метаболические пути, изменяя экспрессию генов. При этом гены, реагирующие на конкретную АК, тесно связаны с её эффектами. Например, для глутамата это эффекты в отношении воспалительной реакции, пролиферации, дифференцировки и выживания клеток, а также метаболических функций [3]. В этом свете становится ещё более актуальным мониторинг «незаменимых» АК [2, 4], к которым, помимо

указанного выше треонина, относятся: триптофан, фенилаланин, лизин, аргинин, гистидин, метионин, лейцин, изолейцин и валин [4, 5, 6].

Было обнаружено, что ряд АК с разветвленной цепью (например, изолейцин, лейцин и валин) улучшают качество свинины, способствуют росту мышечной ткани, усиливают развитие кишечника и активно участвуют в регуляции иммунного ответа [7]. Имеются данные о том, что некоторые свободные АК (т. е. не связанные в белковые молекулы), а также их производные могут выступать в роли регуляторных факторов для соединения основных метаболических процессов в организме животных и человека [7, 8]. Например, метаболиты аланина, 4-гидроксипролина, тирозина, метионина и т. д. связаны с циклом Кребса, который является связующим для многих метаболических путей [2, 4, 9]. Кроме того, Ф. Чжан и соавт. (F. Zhang et al.) в своих исследованиях установили зависимость между содержанием меди в печени у свиней и концентрацией ряда АК: лейцина, фенилаланина, метионина, пролина, тирозина. Это указывает на их участие в минеральном обмене [10].

Авторы [8] считают, что наиболее важными АК для свиней являются лизин, метионин, треонин и триптофан. Лизин входит в состав всех белков организма и является первой лимитирующей АК для отложения мышечной ткани для свиней [11]. Причём хрякам нужно больше лизина, чем свинкам для достижения максимальных показателей роста, поскольку

самцы более худощавые и темпы роста у них выше [11]. Лизин оказывает положительное влияние на морфологию ворсинок кишечника при поступлении немного выше предполагаемой потребности и ослабляет атрофию ворсинок после отъема поросят от свиноматки [12]. Треонин является одним из основных компонентов α -глобулина плазмы домашней птицы, кроликов, человека и свиней. Исследования Р. О. Болл (R. O. Ball) показали, что поросята-отъемыши, получавшие рацион с дефицитом треонина, были особенно восприимчивы к диарее [13]. Кроме того, есть сообщения о взаимосвязи между уровнями треонина в пище и выработкой IgG у свиней [14]. В совокупности эти данные свидетельствуют о роли треонина в иммунной функции. Серосодержащие АК (метионин, цистеин), являющиеся строительными блоками всех белков, жестко регулируют скорость роста мышечной массы [15]. Сообщалось о сниженном содержании белка, более низкой фракционной скорости синтеза белка, сниженной активности протеолитических ферментов, но более высоком гликолитическом потенциале в мышцах свиней с дефицитом общего количества серосодержащих АК [16].

Важно подчеркнуть, что четких референсных интервалов для АК состава тканей свиней практически не существует. Поэтому для объективного рассмотрения этого вопроса надо использовать многочисленные работы нашей группы [2, 4], А. С. Неупокоевой и А. В. Ильтякова [5], Л. А. Морозовой и др. [6], А. В. Ильтякова и др. [9], М. А. Петуховой и др. [17], а также зарубежных авторов [10, 11, 16], в которых были опубликованы сопоставимые данные по содержанию общих и свободных АК в крови и мясе свиней различных пород. Например, М. А. Петухова и др. [17] исследовали АК состав мяса свиней нескольких пород, в том числе дюрок, а Л. А. Морозова и др. [6] изучали содержание АК в мышечной ткани свиней-гибридов (ландрас $\times$ йоркшир $\times$ дюрок). Так, содержание ряда АК, например валина, у свиней-гибридов было существенно ниже, чем у чистопородных дюрок (0,985 и 1,460 г/100 мл соответственно [4, 6, 17]). В свою очередь, фенилаланин, гистидин, треонин, метионин и триптофан были обнаружены почти в равных количествах [4, 6, 17].

На сегодняшний день практически нет работ по изучению особенностей, взаимосвязей и отличий АК состава и биохимических показателей крови свиней разных породных и возрастных групп [18].

Таким образом, детальное изучение особенностей и взаимосвязей между АК составом и биохимическими показателями крови свиней разных породных и возрастных групп будет актуальным и полезным как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения.

Цель исследований – измерение биохимических параметров крови и её аминокислотного состава в сравнительном аспекте для чистопородных свиней породы ландрас и их двухпородных гибридов с крупной белой породой в динамике откорма и анализ установленных взаимосвязей между изучаемыми показателями.

Научная новизна – впервые в рамках данного исследования выполнен сравнительный анализ биохимических показателей крови в зависимости от породных и возрастных различий для чистой породы ландрас и их гибридов с крупной белой породой на сроках откорма от 60 до 110 дней.

Материал и методы. Исследования проводили на борах ($n = 40$) двух породных групп и двух возрастных категорий: 1) ландрас 60–65 дней откорма (живая масса $61,8 \pm 2,4$ кг); 2) ландрас $\times$ крупная белая 60–65 дней откорма (живая масса $60,5 \pm 3,2$); 3) ландрас 100–110 дней откорма (живая масса $104,5 \pm 1,50$ кг); 4) ландрас $\times$ крупная белая 100–110 дней откорма (живая масса $103,4 \pm 1,70$ кг). В каждой группе по десять голов, отобранных по принципу аналогов. Возраст поросят при постановке на откорм составлял 3–4 месяца. Все исследуемые животные были клинически здоровы. Питательность рациона: сухое вещество – 2,45 кг, обменная энергия – 34,8 МДж, сырой протеин – 452 г, сырая клетчатка – 137 г, лизин – 20,2 г, метионин + цистеин – 12,5 г, кальций – 20 г и фосфор – 16 г для 1 и 2 группы; сухое вещество – 3,08 кг, обменная энергия – 45,9 МДж, сырой протеин – 528 г, сырая клетчатка – 196 г, лизин – 22,9 г, метионин + цистеин – 14,9 г, кальций – 25 г и фосфор – 20 г для 3 и 4 группы.

Условия содержания животных (температурный, влажностный, световой режимы и газовый состав воздуха в помещении) в исследуемые периоды были одинаковы и в пределах зооигиенических норм. Протокол исследования на животных одобрен биоэтической комиссией ФГБНУ ФИЦ ВИЖ имени Л. К. Эрнста (протокол № 2, от 20 марта 2023 г.). Эксперименты проведены с соблюдением требований, изложенных в Директиве Европейского парламента и Совета Европейского союза 2010/63/ЕС от 22 сентября 2010 года о защите животных, использующихся для научных целей и прин-

ципам обращения с животными¹, согласно статье 4 ФЗ РФ N 498-ФЗ².

Образцы крови брали из ушной вены. Сыворотку отделяли центрифугированием в течение 15 мин при 3000 об/мин (лабораторная центрифуга CM-12, Россия) [4].

Биохимические показатели образцов сыворотки крови животных определяли на автоматическом биохимическом анализаторе ChemWell (Awareness Technology, США) с использованием реактивов фирм Analyticon Biotechnologies AG (Германия) и Spinreact (Испания). Определяли следующие биохимические показатели: концентрацию общего белка – биуретовым методом; содержание альбумина – колориметрическим методом с бромкрезоловым зеленым; глобулины – расчетным методом, вычитая из общего белка альбумин; мочевины – ферментативным колориметрическим (метод Бертра); креатинина – кинетическим методом Яффе; глюкозы – ферментативным глюкозооксидазным методом; холестерина – ферментативно-колориметрическим методом [4, 19, 20].

Определение концентрации АК в сыворотке крови осуществляли методом ионообменной хроматографии с постколоночной дериватизацией проб нингидрином. Для этого в отделе физиологии и биохимии с.-х. животных ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л. К. Эрнста имеется система высокоэффективной жидкостной хроматографии LC-20 Prominence (Shimadzu, Япония), оснащенная реакционным модулем для пост-колоночной дериватизации нингидрином APM-1000 (Sevko&Co, Россия), и колонка с ионообменной смолой (Sevko&Co, Россия) [2, 4]. Подготовку проб для анализа осуществляли в соответствии с ГОСТ 32195-2013³ [4], для чего использовали кислотный гидролиз 6 Н HCl для разложения белков на отдельные АК с добавлением норлейцина в качестве внутреннего стандарта. Гидролиз выполняли в фторопластовых стаканах с закручивающейся крышкой (СЕМ, США) в термостате при 110 °С в течение 24 часов. Для определения серосодержащих АК (метионина, цистеина) пробы перед гидролизом обрабатывали смесью для окисления (надмуравьиная кислота с фенолом в качестве консерванта). Триптофан разрушается в процессе кислотного

гидролиза, потому его не определяли, аспарагин и глутамин в условиях гидролиза переходят в соответствующие кислоты и на хроматограмме определяются вместе с аспарагиновой и глутаминовой кислотами.

Обработку полученных данных выполняли в программах R и Microsoft Excel с расширенным пакетом анализа данных.

Нормальность распределения данных оценивали по критерию Шапиро-Уилка (W), поскольку эффективность всех подобных тестов сопоставима на малых объемах данных. Если рассчитанный W-критерий теста Шапиро-Уилка на нормальность распределения данных не совпадал со значением из соответствующей таблицы, приблизительное значение p рассчитывали, используя линейную интерполяцию, по формуле:

$$p_2 = (W_2 - W_1)(p_3 - p_1)/(W_3 - W_1) + p_1,$$

где p_2 – искомое значение, W_2 – расчетное значение критерия, W_1 – минимальное ближайшее значение к рассчитанному W-критерию из таблицы, W_3 – максимальное ближайшее значение к рассчитанному W-критерию из таблицы, p_1 – значение p соответствующее W_1 ; p_3 – значение p соответствующее W_3 .

При уровне значимости $\alpha = 0,05$ и $n = 10$ подбирали соответствующие значения критерия W и p. Если в результате расчетное значение p больше $\alpha = 0,05$, следовательно, нулевую гипотезу (о нормальности распределения данных) не отвергали и предполагали, что полученные данные соответствуют нормальному распределению.

Гомогенность дисперсии оценивали по тесту Левена (расчет от среднего значения). Если p при оценке гомогенности дисперсии больше $\alpha = 0,05$, значит тест удовлетворяет предположению об однородности дисперсии. При сравнительном анализе межгрупповых различий использовали следующий подход. Для показателей, где гипотеза о нормальности распределения данных не была отвергнута (тест Шапиро-Уилка), а гипотеза о гомогенности дисперсии (тест Левена) подтвердилась, попарные сравнения выполнены однофакторным дисперсионным анализом в сочетании с тестом Тьюки-Крамера – для компенсации множественности.

¹Федеральный закон от 27.12.2018 № 498-ФЗ (ред. от 08.08.2024) "Об ответственном обращении с животными и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации". [Электронный ресурс].

URL: <https://legalacts.ru/doc/federalnyi-zakon-ot-27122018-n-498-fz-ob-otvetstvennom-obrashchenii/> (дата обращения: 27.09.2024).

²Директива Европейского парламента и Совета Европейского союза 2010/63/ЕС от 22 сентября 2010 года о защите животных. [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/70350564/> (дата обращения: 27.09.2024).

³ГОСТ 32195-2013. Корма. Комбикорма. Метод определения содержания аминокислот. М.: Стандартинформ, 2014. 23 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293773/4293773804.pdf>

Для показателей, где гипотеза о нормальности распределения данных была отвергнута (тест Шапиро-Уилка), а гипотеза о гомогенности дисперсии (тест Левена) не подтвердилась, попарные сравнения выполнены с использованием критерия Краскела-Уоллиса с поправкой Бонферрони в сочетании с тестом Манна-Уитни.

Таблица 1 – Состав сыворотки крови свиней породы ландрас и гибридов ландрас × крупная белая на 60–65-ый и 100–110-ый день откорма /

Table 1 – Blood serum composition from of Landrace pigs and Landrace × Large White hybrids on days 60–65 and 100–110 of fattening /

Показатель / Index	Группа (n = 10) / Group	M±m	Me	Q1	Q3	IQR
1	2	3	4	5	6	7
Общ белок, г/л / Total protein, g/l	1	52,10±4,52	52,6	49,6	53,9	4,3
	2	50,60±2,23	49,7	49,4	52,6	3,2
	3	56,33±3,00	56,6	55,6	58,0	2,4
	4	57,60±5,43	55,0	53,0	62,3	9,3
Альбумин, г/л / Albumin, g/l	1	30,68±3,27	30,9	28,7	31,3	2,6
	2	29,63±0,91	29,9	29,0	30,1	1,1
	3	34,06±1,64	34,1	32,9	35,1	2,2
	4	35,93±2,33	35,4	33,8	38,2	4,4
Глобулин, г/л / Globulin, g/l	1	21,4±4,27	20,7	18,0	23,4	5,4
	2	20,97±2,36	21,2	19,2	23,0	3,8
	3	22,27±2,52	22,2	21,5	23,4	1,9
	4	21,67±3,37	20,7	18,8	23,9	5,1
Мочевина, мм/л / Urea, mM/l	1	2,15±0,38	2,1	1,9	2,3	0,4
	2	2,13±0,55	2,2	1,6	2,7	1,1
	3	3,06±0,90	2,7	2,5	3,7	1,2
	4	4,31±1,65	3,8	3,5	6,0	2,5
Креатинин, мкМ/л / Creatinine, mmol/l	1	89,43±4,25	89,5	85,5	92,5	7
	2	89,73±8,43	90,5	82,2	92,6	10,4
	3	106,73±13,76	106,6	98,8	115,2	16,4
	4	102,71±23,04	101,1	81,7	120,7	39
Глюкоза, мм/л / Glucose, mM/l	1	5,35±0,52	5,2	5,0	5,5	0,5
	2	5,48±0,57	5,6	5,5	5,8	0,3
	3	4,63±0,60	4,5	4,4	5,2	0,8
	4	4,92±0,77	5,4	4,1	5,5	1,4
Холестерин, мм/л / Cholesterol, mM/l	1	2,49±0,35	2,5	2,2	2,7	0,5
	2	2,45±0,18	2,4	2,3	2,6	0,3
	3	2,82±0,22	2,8	2,6	3,0	0,4
	4	2,80±0,38	2,9	2,4	3,1	0,7
Аспарагиновая кислота, г/100 мл / ASP, g/100 ml	1	0,49±0,03	0,492	0,472	0,510	0,038
	2	0,48±0,03	0,478	0,453	0,508	0,055
	3	0,56±0,04	0,573	0,534	0,579	0,045
	4	0,58±0,04	0,554	0,544	0,614	0,070
Треонин, г/100 мл / THR, g/100 ml	1	0,27±0,02	0,275	0,253	0,277	0,024
	2	0,26±0,02	0,261	0,242	0,278	0,036
	3	0,27±0,02	0,269	0,261	0,287	0,026
	4	0,26±0,02	0,256	0,242	0,282	0,040
Серин, г/100 мл / SER, g/100 ml	1	0,29±0,03	0,280	0,271	0,293	0,022
	2	0,28±0,03	0,269	0,249	0,310	0,061
	3	0,33±0,03	0,328	0,315	0,341	0,026
	4	0,34±0,02	0,333	0,323	0,357	0,034
Глутаминовая кислота, г/100 мл / GLU, g/100 ml	1	0,80±0,05	0,784	0,774	0,797	0,023
	2	0,77±0,07	0,781	0,742	0,823	0,081
	3	0,86±0,02	0,859	0,843	0,875	0,032
	4	0,85±0,05	0,825	0,808	0,904	0,096

Результаты и их обсуждение. 1. Статистический анализ биохимических параметров и аминокислотного состава сыворотки крови для исследуемых групп свиней.

Установленные значения биохимических параметров и АК состава сыворотки крови свиней для четырех групп представлены в таблице 1.

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
Глицин, г/100 мл / GLY, g/100 ml	1	0,21±0,01	0,214	0,202	0,214	0,012
	2	0,20±0,02	0,203	0,188	0,223	0,035
	3	0,19±0,03	0,175	0,161	0,219	0,058
	4	0,16±0,01	0,156	0,153	0,174	0,021
Аланин, г/100 мл / ALA, g/100 ml	1	0,32±0,01	0,317	0,314	0,321	0,007
	2	0,31±0,01	0,304	0,299	0,317	0,018
	3	0,37±0,03	0,380	0,337	0,385	0,048
	4	0,39±0,03	0,368	0,363	0,419	0,056
Валин, г/100 мл / VAL, g/100 ml	1	0,35±0,02	0,354	0,343	0,360	0,017
	2	0,34±0,03	0,341	0,321	0,360	0,039
	3	0,40±0,03	0,402	0,372	0,413	0,041
	4	0,41±0,04	0,391	0,385	0,439	0,054
Изолейцин, г/100 мл / ILE, g/100 ml	1	0,20±0,01	0,203	0,195	0,206	0,011
	2	0,20±0,01	0,195	0,189	0,203	0,014
	3	0,22±0,01	0,222	0,211	0,227	0,016
	4	0,21±0,04	0,216	0,213	0,234	0,021
Лейцин, г/100 мл / LEU, g/100 ml	1	0,60±0,03	0,594	0,583	0,601	0,018
	2	0,57±0,06	0,587	0,566	0,608	0,042
	3	0,63±0,02	0,623	0,610	0,651	0,041
	4	0,62±0,05	0,598	0,583	0,664	0,081
Тирозин, г/100 мл / TYR, g/100 ml	1	0,37±0,02	0,376	0,359	0,380	0,021
	2	0,35±0,02	0,349	0,337	0,373	0,036
	3	0,35±0,03	0,337	0,330	0,386	0,056
	4	0,33±0,02	0,329	0,317	0,350	0,033
Фенилаланин, г/100 мл / PHE, g/100 ml	1	0,38±0,02	0,380	0,371	0,381	0,01
	2	0,37±0,01	0,369	0,357	0,374	0,017
	3	0,39±0,01	0,390	0,376	0,402	0,026
	4	0,38±0,03	0,368	0,359	0,402	0,043
Гистидин, г/100 мл / HIS, g/100 ml	1	0,25±0,02	0,245	0,238	0,249	0,011
	2	0,23±0,02	0,235	0,228	0,238	0,010
	3	0,23±0,01	0,233	0,225	0,238	0,013
	4	0,22±0,01	0,217	0,214	0,223	0,009
Лизин, г/100 мл / LYS, g/100 ml	1	0,49±0,04	0,478	0,459	0,487	0,028
	2	0,46±0,05	0,474	0,451	0,491	0,040
	3	0,55±0,06	0,579	0,508	0,597	0,089
	4	0,59±0,03	0,578	0,563	0,613	0,050
Аргинин, г/100 мл / ARG, g/100 ml	1	0,35±0,03	0,341	0,337	0,363	0,026
	2	0,34±0,02	0,340	0,328	0,363	0,035
	3	0,39±0,03	0,400	0,382	0,408	0,026
	4	0,40±0,02	0,395	0,385	0,417	0,032
Пролин, г/100 мл / PRO, g/100 ml	1	0,27±0,01	0,273	0,264	0,282	0,018
	2	0,27±0,02	0,267	0,254	0,289	0,035
	3	0,27±0,05	0,239	0,232	0,313	0,081
	4	0,23±0,02	0,224	0,215	0,255	0,040
Цистеин, г /100 г / CYS, g/100 ml	1	0,150±0,014	0,152	0,145	0,156	0,011
	2	0,150±0,011	0,148	0,144	0,155	0,011
	3	0,173±0,014	0,171	0,170	0,183	0,013
	4	0,174±0,015	0,169	0,163	0,186	0,023
Метионин, г/100 мл / MET, g/100 ml	1	0,053±0,008	0,052	0,047	0,055	0,008
	2	0,050±0,004	0,050	0,048	0,051	0,003
	3	0,044±0,007	0,043	0,039	0,046	0,007
	4	0,035±0,005	0,037	0,033	0,037	0,004

Примечания. Группы: 1 – ландрас, 60–65 дней откорма; 2 – гибрид ландрас × крупная белая, 60–65 дней откорма; 3 – ландрас, 100–110 дней откорма; 4 – гибрид ландрас × крупная белая, 100–110 дней откорма; М – среднее значение; ±m – ошибка среднего; Me – медиана; Q1 – первый квартиль; Q3 – третий квартиль; IQR – межквартильный размах /

Notes: Groups: 1 – Landrace, 60–65 days of fattening; 2 – Landrace × Large White hybrid, 60–65 days of fattening; 3 – Landrace, 100–110 days of fattening; 4 – Landrace × Large White hybrid, 100–110 days of fattening; M – the average value; ±m – average error; Me – median; Q1 – first quartile; Q3 – third quartile; IQR – interquartile range

Данные, полученные в ходе исследований, соответствуют видовым референтным интервалам. В таблице 2 приводим результаты

проверки полученных данных на их соответствие нормальному распределению.

Таблица 2 – Проверка распределения данных по критерию Шапиро-Уилка и оценка гомогенности дисперсии по тесту Левена /

Table 2 – Verification of the data distribution by the Shapiro-Wilk criterion and estimation of the homogeneity of the variance by the Levene method

Показатель / Index	Группа, p / Group, p				Тест Левена, p / Levene test, p
	1	2	3	4	
Общ белок, г/л / Total protein, g/l	0,99	0,30	0,07	0,04	0,008
Альбумин, г/л / Albumin, g/l	0,85	0,77	0,96	0,07	0,013
Глобулин, г/л / Globulin, g/l	0,52	0,43	0,67	0,07	0,047
Мочевина, мм/л / Urea, mM/l	0,23	0,04	0,39	0,07	0,001
Креатинин, мкМ/л / Creatinine, mmol/l	0,33	0,47	0,50	0,02	0,001
Глюкоза, мм/л / Glucose, mM/l	0,25	0,03	0,47	0,01	0,101
Холестерин, мм/л / Cholesterol, mM/l	0,57	0,75	0,54	0,06	0,038
Аспарагиновая кислота, г/100 мл / ASP, g/100 ml	0,95	0,56	0,53	0,05	0,502
Треонин, г/100 мл / THR, g/100 ml	0,27	0,18	0,68	0,42	0,399
Серин, г/100 мл / SER, g/100 ml	0,73	0,17	0,57	0,64	0,687
Глутаминовая кислота, г/100 мл / GLU, g/100 ml	0,53	0,49	0,87	0,04	0,044
Глицин, г/100 мл / GLY, g/100 ml	0,10	0,24	0,02	0,07	0,001
Аланин, г/100 мл / ALA, g/100 ml	0,47	0,08	0,35	0,03	0,001
Валин, г/100 мл / VAL, g/100 ml	0,18	0,92	0,90	0,07	0,062
Изолейцин, г/100 мл / ILE, g/100 ml	0,47	0,13	0,64	0,01	0,199
Лейцин, г/100 мл / LEU, g/100 ml	0,45	0,01	0,28	0,05	0,233
Тирозин, г/100 мл / TYR, g/100 ml	0,08	0,25	0,04	0,30	0,149
Фенилаланин, г/100 мл / PHE, g/100 ml	0,35	0,91	0,20	0,10	0,024
Гистидин, г/100 мл / HIS, g/100 ml	0,02	0,01	0,50	0,21	0,505
Лизин, г/100 мл / LYS, g/100 ml	0,02	0,01	0,15	0,53	0,108
Аргинин, г/100 мл / ARG, g/100 ml	0,71	0,38	0,25	0,48	0,924
Пролин, г/100 мл / PRO, g/100 ml	0,69	0,52	0,01	0,04	0,001
Цистеин, г /100 г / CYS, g/100 ml	0,30	0,70	0,70	0,46	0,678
Метионин, г/100 мл / MET, g/100 ml	0,16	0,06	0,88	0,49	0,187

Примечание: жирным шрифтом выделены показатели, для которых соблюдается условие о нормальности распределения во всех четырех группах и условие о гомогенности дисперсии /

Note: bold highlights the indicators for which the condition of normality of distribution in all four groups and the condition of homogeneity of variance are met

В первой группе исключениями стали данные показателей АК анализа: гистидин и лизин. Во второй группе распределение данных по показателям: мочевина, глюкоза, лейцин, гистидин и лизин – отличаются от нормального распределения. В третьей группе большинство изученных показателей соответствуют нормальному распределению. Исключениями стали: глицин, тирозин и пролин. В

четвертой группе самая большая доля данных отличается от нормального распределения (38 %, 9 из 24 показателей): общий белок, креатинин, глюкоза, аспарагиновая кислота, глутаминовая кислота, аланин, изолейцин, лейцин, пролин.

2. Результаты апостериорных тестов попарного сравнения групп. Данные о проверке распределения полученных данных по кри-

терию Шапиро-Уилка и оценка гомогенности дисперсии исследуемых переменных в группах по тесту Левена (табл. 2) позволяют выполнить однофакторный дисперсионный анализ и попарные сравнения по тесту Тьюки-Крамера для следующих показателей: тирозин, серин, валин, фенилаланин, аргинин, цистеин, метионин. Для остальных данных выполнен критерий Краскела-Уоллиса с поправкой

Бонферрони. Попарные сравнения выполнены по тесту Манна-Уитни (табл. 3). В эту группу данных вошли результаты по следующим показателям: общий белок, альбумины, глобулины, мочевины, креатинин, глюкоза, холестерин, аспарагиновая кислота, глутаминовая кислота, глицин, аланин, изолейцин, лейцин, тирозин, гистидин, лизин, пролин.

Таблица 3 – Сравнительный анализ изучаемых групп по аминокислотным и биохимическим показателям /
Table 3 – Comparative analysis of the studied groups by amino acid and biochemical parameters

Показатель / Index	ОДА, p / ANOVA, p	Для групп / For groups	Тест Тьюки-Крамера, p / Tukey-Kramer test, p
1	2	3	4
<i>Анализ изменчивости признака для данных с распределением, соответствующим нормальному, и гомогенной дисперсией / Feature variability analysis, for data with a normal distribution and homogeneous variance</i>			
Фенилаланин, г/100 мл / PHE, g/100 ml	0,127	-	-
Тирозин, г/100 мл / TYR, g/100 ml	0,055	-	-
Треонин, г/100 мл / THR, g/100 ml	0,603	-	-
Серин, г/100 мл / SER, g/100 ml	<0,001	1/2 3/4 1/3 2/4	0,876 0,893 0,013 <0,001
Валин, г/100 мл / VAL, g/100 ml	<0,001	1/2 3/4 1/3 2/4	0,766 <0,001 0,006 <0,001
Аргинин, г/100 мл / ARG, g/100 ml	<0,001	1/2 3/4 1/3 2/4	0,982 0,868 0,001 <0,001
Цистеин, г/100 мл / CYS, g/100 ml	<0,001	1/2 3/4 1/3 2/4	1,000 0,998 0,003 0,002
Метионин, г/100 мл / MET, g/100 ml	<0,001	1/2 3/4 1/3 2/4	0,668 0,036 0,008 <0,001
<i>Анализ изменчивости признака для данных, где распределение отличается от нормального, а дисперсия гетерогенная /</i> <i>Feature variability analysis, for data where the distribution differs from normal and the variance is heterogeneous</i>			
Показатель / Index	Тест Краскела-Уоллиса, p / The Kruskal-Wallis test, p	Для групп / For groups	Тест Манна-Уитни, p / Mann-Whitney test, p
Глобулин, г/л / Globulin, g/l	0,828	-	-
Креатинин, мкм/л / Creatinine, mmol/l	0,057	-	-
Глюкоза, мм/л / Glucose, mM/l	0,012	1/2 3/4 1/3 2/4	1,000 1,000 0,222 0,306
Холестерин, мм/л / Cholesterol, mM/l	0,015	1/2 3/4 1/3 2/4	1,000 1,000 0,117 0,184

Продолжение табл. 3

1	2	3	4
Лейцин, г/100 мл / LEU, g/100 ml	0,032	1/2 3/4 1/3 2/4	1,000 1,000 0,320 0,490
Гистидин, г/100 мл / HIS, g/100 ml	0,001	1/2 3/4 1/3 2/4	0,320 0,381 0,184 0,222
Общий белок, г/л / Total protein, g/l	<0,001	1/2 3/4 1/3 2/4	1,000 1,000 0,101 0,015
Альбумин, г/л / Albumin, g/l	<0,001	1/2 3/4 1/3 2/4	1,000 1,000 0,184 <0,001
Мочевина, мМ/л / Urea, mM/l	0,001	1/2 3/4 1/3 2/4	1,000 1,000 0,197 0,008
Аспарагиновая кислота, г/100 мл / ASP, g/100 ml	<0,001	1/2 3/4 1/3 2/4	1,000 1,000 0,014 <0,001
Глутаминовая кислота, г/100 мл / GLU, g/100 ml	0,002	1/2 3/4 1/3 2/4	1,000 1,000 0,042 0,066
Глицин, г/100 мл / GLY, g/100 ml	<0,001	1/2 3/4 1/3 2/4	1,000 0,151 0,674 0,003
Аланин, г/100 мл / ALA, g/100 ml	<0,001	1/2 3/4 1/3 2/4	1,000 1,000 0,035 <0,001
Изолейцин, г/100 мл / ILE, g/100 ml	<0,001	1/2 3/4 1/3 2/4	1,000 1,000 0,035 0,003
Лизин, г/100 мл / LYS, g/100 ml	<0,001	1/2 3/4 1/3 2/4	1,000 1,000 0,091 0,001
Пролин, г/100 мл / PRO, g/100 ml	0,005	1/2 3/4 1/3 2/4	1,000 0,193 1,000 0,028

Примечания: жирным шрифтом – значимые различия; ОДА – однофакторный дисперсионный анализ /
Notes: in bold – significant differences; ANOVA – Analysis of Variance

Данные выполненных апостериорных тестов при анализе породных и возрастных особенностей свиней на откорме позволяют нам сделать следующие выводы. Свиньи чистой породы ландрас и их гибриды с крупной белой породой очень схожи по уровню метаболизма,

который оценивали по показателям биохимии крови и её АК составу. Не было обнаружено статистически значимых различий в группах 1 и 2. С возрастом для групп 3 и 4 установлены значимые различия только для АК – метионина и валина. Среднее значение метионина на

0,009 г/100 мл ($p = 0,036$) выше в 3-й группе, валина на 0,01 г/100 мл ($p < 0,001$) больше в 4-й группе (табл. 1, 3).

В динамике откорма с изменением возраста установлены значимые отличия для чистопородных свиней породы ландрас (группы 1 и 3). В группе 3 больше содержание серина на 0,04 г/100 мл ($p = 0,013$), валина на 0,05 г/100 мл ($p = 0,006$), аргинина на 0,04 г/100 мл ($p = 0,001$), цистеина на 0,023 г/100 мл ($p = 0,003$), аспарагиновой кислоты на 0,07 г/100 мл ($p = 0,014$), глутаминовой кислоты на 0,06 г/100 мл ($p = 0,042$), аланина на 0,05 г/100 мл ($p = 0,035$), изолейцина на 0,02 г/100 мл ($p = 0,035$) и меньше метионина на 0,009 г/100 мл ($p = 0,008$) в сравнении с 1-й группой (табл. 1, 3).

В динамике откорма с изменением возраста для гибридов ландрас $\times$ крупная белая (группы 2 и 4) установлено больше всего значимых различий – по 14 изученным показателям из 24 исследованных в работе. В группе 4 больше содержание валина на 0,07 г/100 мл ($p < 0,001$), аргинина на 0,06 г/100 мл ($p < 0,001$), цистеина на 0,024 г/100 мл ($p = 0,002$), аспарагиновой кислоты на 0,10 г/100 мл ($p < 0,001$), аланина на 0,08 г/100 мл ($p < 0,001$), изолейцина на 0,01 г/100 мл ($p = 0,003$), лизина на 0,13 г/100 мл ($p = 0,001$), общего белка на 7,0 г/л ($p = 0,015$), альбуминов на 6,3 г/л ($p < 0,001$), мочевины на 2,18 мм/л ($p = 0,008$) в сравнении со 2-ой группой. Менше содержание серина на 0,06 г/100 мл ($p < 0,001$), метионина на 0,015 г/100 мл ($p < 0,001$), глицина на 0,04 г/100 мл ($p = 0,003$), пролина на 0,04 г/100 мл ($p = 0,028$) (табл. 1, 3), чем у животных 2-ой группы.

В динамике откорма изменяется содержание ряда АК, как общую закономерность для свиней породы ландрас и гибридов ландрас $\times$ крупная белая отметим изменение содержания аспарагиновой кислоты, серина, аланина, валина, изолейцина, аргинина, цистеина, метионина. Большая их часть увеличивается, как описано выше. Видимо в связи с тем, что порядок этих изменений несколько выше для гибридов, здесь же наблюдаем и увеличение таких показателей, как общий белок, альбумины, мочевина. Стоит при этом отметить, что все изученные в работе показатели находились в границах референсных значений, характерных для клинически здоровых свиней, что соотносится с рядом работ других авторов [19, 20, 21, 22, 23]. Биохимический и АК состав крови, как косвенный показатель интенсивности обменных процессов, свидетельствует о более высоком уровне метаболизма у гибридов.

Так, лизин является первой лимитирующей кислотой для синтеза белков в организме свиней. Можно предположить, что за счёт более эффективного использования лизина, о чём свидетельствует достоверный рост содержания данной АК в динамике откорма у гибридов ландрас $\times$ крупная белая, наблюдается закономерный рост общего белка и альбуминовой фракции у гибридных свиней. Вместе с ростом белковых показателей крови растёт содержание ряда функциональных АК. Изолейцин, лейцин, валин – улучшают качество свинины, глутаминовая кислота – вкусовые качества мяса. Другая важная роль изолейцина и лейцина, как незаменимых АК разветвлённого строения – активная роль в глюконеогенезе и синтезе ряда заменимых АК и других органических соединений, необходимых для жизнедеятельности организма. Вместе с этим наблюдается снижение количества метионина, что может быть связано с его активным расходом на синтез белков именно свободной, не связанной фракцией, данной АК. Кроме того, метионин – вторая лимитирующая кислота у свиней, обеспечивающая организм доступной серой. Цистеин, в свою очередь, служит для поддержания третичной и четвертичной структуры белков за счёт образования дисульфидных связей. Увеличение его количества в сыворотке крови свиней в динамике откорма напрямую связано с интенсификацией синтеза белка.

Заключение. При изучении биохимических показателей крови и её аминокислотного состава в период откорма 60–65 дней не установлено значимых различий между породой ландрас и их гибридами с крупной белой породой. При откорме 100–110 дней обнаружено достоверно больше метионина в третьей группе ($p = 0,036$), а валина – в четвертой группе ($p < 0,001$).

У свиней породы ландрас на 100–110-ый день откорма выше содержание отдельных аминокислот в крови в сравнении с животными данной породы на 60–65-ый день откорма. Установлено, что в 3-й группе больше серина ($p = 0,013$), валина ($p = 0,006$), аргинина ($p = 0,001$), цистеина ($p = 0,003$), аспарагиновой кислоты ($p = 0,014$), глутаминовой кислоты ($p = 0,042$), аланина ($p = 0,035$), изолейцина ($p = 0,035$) и меньше метионина ($p = 0,008$).

У гибридов ландрас $\times$ крупная белая на 100–110-ый день откорма выше содержание валина ($p < 0,001$), аргинина ($p < 0,001$), цистеина ($p = 0,002$), аспарагиновой кислоты ($p < 0,001$),

аланина ($p < 0,001$), изолейцина ($p = 0,003$), лизина ($p = 0,001$), общего белка ($p = 0,015$), альбу-минов ($p < 0,001$), мочевины ($p = 0,008$), стало меньше содержание серина ($p < 0,001$), метионина ($p < 0,001$), глицина ($p = 0,003$), пролина ($p = 0,028$) в сравнении с гибридами на 60–65-ый день откорма.

Таким образом, при оценке влияния таких факторов, как порода и сроки откорма на изменение биохимических показателей и аминокислотного состава крови свиней большее влияние оказывают возрастные динамики, которые ярче проявлены у гибридов в сравнении с чистой породой.

Список литературы

1. Chalvon-Demersay T., Luise D., Le Floc'h N., Tesseraud S., Lambert W., Bosi P. et al. Functional amino acids in pigs and chickens: implication for gut health. *Frontiers in Veterinary Science*. 2021;8:663727. DOI: <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.663727>
2. Zaitsev S. Y., Kolesnik N. S., Bogolyubova N. V. Correlations between the major amino acids and biochemical blood parameters of pigs at controlled fattening duration. *Molecules*. 2022;27(7):2278. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27072278>
3. Brasse-Lagnel C., Lavoigne A., Husson A. Control of mammalian gene expression by amino acids, especially glutamine. *The FEBS Journal*. 2009;276(7):1826–1844. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1742-4658.2009.06920.x>
4. Зайцев С. Ю., Боголюбова Н. В., Молянова Г. В. Биохимический анализ крови ряда пород свиней и их гибридов. М.: Издательство «Сельскохозяйственные технологии», 2022. 256 с.
5. Неупокоева А. С., Ильяков А. В. Аминокислотный состав мяса свиней разных генотипов. Актуальные проблемы и научное обеспечение развития современного животноводства: сб. ст. по мат-лам Всеросс. (национальной) научно-практ. конф. Лесниково: Курганская ГСХА им. Т. С. Мальцева, 2019. С. 182–187. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41157709> EDN: HCOUW
6. Морозова Л. А., Миколайчик И. Н., Ильяков А. В., Ступина Е. С., Дускаев Г. К. Аминокислотный состав мышечной ткани чистопородных и гибридных свиней в условиях континентального климата России. *Аграрный вестник Урала*. 2019;(10(189)):40–46. DOI: https://doi.org/10.32417/article_5db430cb30bca8.95126056 EDN: YNOJDU
7. Zhang S., Zeng X., Ren M., Mao X., Qiao S. Novel metabolic and physiological functions of branched chain amino acids: a review. *Journal of animal science and biotechnology*. 2017;8:10. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40104-016-0139-z>
8. Зайко О. А., Короткевич О. С., Петухов В. Л. Содержание макро- и микроэлементов в печени свиней скороспелой мясной породы (СМ-1) и их связь с уровнем свободных аминокислот в сыворотке крови. *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2013;(5):51–53. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=qzeyjl> EDN: QZEYJL
9. Ильяков А. В., Миколайчик И. Н., Морозова Л. А., Ступина Е. С. Метод повышения биологической полноценности мышечной и жировой ткани свиней. *Аграрный вестник Урала*. 2015;6(136):34–37. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24000585> EDN: UFFIGF
10. Zhang F., Zheng W., Xue Y., Yao W. Suhuai suckling piglet hindgut microbiome-metabolome responses to different dietary copper levels. *Applied microbiology and biotechnology*. 2019;103:853–868. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9533-0>
11. Aymerich P., Tokach M. D., Dritz S. S., Gasa J., Coma J., Solà-Oriol D. Lysine requirements of finishing boars and gilts: A meta-analysis. *Animal*. 2021;15(5):100218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100218>
12. He L., Yang H., Hou Y., Li T., Fang J., Zhou X. et al. Effects of dietary L-lysine intake on the intestinal mucosa and expression of CAT genes in weaned piglets. *Amino acids*. 2013;45(2):383–391. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00726-013-1514-0>
13. Ball R. O. Threonine requirement and the interaction between threonine intake and gut mucins in pigs. Symposium of the 2001 Degussa, Banff Pork Seminar. Banff, Alberta, Canada. 2001.
14. Defa L., Changting X., Shiyan Q., Jinhui Z., Johnson E. W., Thacker P. A. Effects of dietary threonine on performance, plasma parameters and immune function of growing pigs. *Animal Feed Science and Technology*. 1999;78(3-4):179–188. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(99\)00005-X](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(99)00005-X)
15. Gondret F., Le Floc'h N., Batonon-Alavo D. I., Perruchot M.-H., Mercier Y., Lebret B. Flash dietary methionine supply over growth requirements in pigs: Multi-faceted effects on skeletal muscle metabolism. *Animal*. 2021;15(7):100268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100268>
16. Conde-Aguilera J. A., Cobo-Ortega C., Mercier Y., Tesseraud S., Van Milgen J. The amino acid composition of tissue protein is affected by the total sulfur amino acid supply in growing pigs. *Animal*. 2014;8(3):401–409. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1751731113002425>
17. Петухова М. А. Аминокислотный состав и биологическая ценность белков мяса свиней различных генотипов. Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2015;59(2):118–123. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23569420> EDN: TVUABN
18. Sorapukdee S., Narunatsopanon S. Comparative study on compositions and functional properties of porcine, chicken and duck blood. *Korean journal for food science of animal resources*. 2017;37(2):228–241. DOI: <https://doi.org/10.5851/kosfa.2017.37.2.228>
19. Соляник С. В., Соляник В. В., Соляник А. В. Зоогигиенические и зоотехнические референтные значения морфологических, биохимических, иммунологических параметров крови и уровня естественной резистентности организма свиней. Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. 2019;(22-2):248–255. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39153375> EDN: GBNKDP

20. Гусев И. В., Рыков Р. А., Боголюбова Н. В. Референтные интервалы биохимических показателей сыворотки крови у свиней. Ветеринария и кормление. 2017;6:31–33.
21. Малиновский А. В. Различия превращения гистидина у человека и других млекопитающих. Цитология. 2021;63(4):403–408. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0041377121040076> EDN: GJJAYL
22. Wadud S., Onodera R., Or-Rashid M. M. Synthesis of histidine in liver and kidney of cattle and swine. Animal Science Journal. 2001;72(3):253–256. DOI: <https://doi.org/10.2508/chikusan.72.253>
23. Пьянкова Е. В., Еримбетов К. Т., Дудин В. И. Оценка протеинового питания поросят-помесей и коррекция аминокислотного состава рациона с учётом соотношения незаменимых аминокислот в стенке кишечника. Проблемы биологии продуктивных животных. 2015;(1):84–95.
Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23379437> EDN: TRPXRД

References

1. Chalvon-Demersay T., Luise D., Le Floc'h N., Tesseraud S., Lambert W., Bosi P. et al. Functional amino acids in pigs and chickens: implication for gut health. Frontiers in Veterinary Science. 2021;8:663727. DOI: <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.663727>
2. Zaitsev S. Y., Kolesnik N. S., Bogolyubova N. V. Correlations between the major amino acids and biochemical blood parameters of pigs at controlled fattening duration. Molecules. 2022;27(7):2278. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27072278>
3. Brasse-Lagnel C., Lavoinne A., Husson A. Control of mammalian gene expression by amino acids, especially glutamine. The FEBS Journal. 2009;276(7):1826–1844. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1742-4658.2009.06920.x>
4. Zaytsev S. Yu., Bogolyubova N. V., Molyanova G. V. Biochemical blood analysis of a number of pig breeds and their hybrids. Moscow: *Izdatel'stvo «Sel'skokho-zyaystvennye tekhnologii»*, 2022. 256 p.
5. Neupokoeva A. S., Iltaykov A. V. Amino acid composition of pig meat different genotypes. Actual problems and scientific support for the development of modern animal husbandry: collection of articles on the Proceedings of the All-Russian (national) scientific and practical conference. Lesnikovo: *Kurganskaya GSKhA im. T. S. Mal'tseva*, 2019. C. 182–187. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41157709>
6. Morozova L. A., Mikolaychik I. N., Iltaykov A. V., Stupina E. S., Duskaev G. K. Amino acid composition of muscle tissue pedicated and hybrid pigs under conditions continental climate of Russia. *Agrarnyy vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals. 2019;(10(189)):40–46. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.32417/article_5db430cb30bca8.95126056
7. Zhang S., Zeng X., Ren M., Mao X., Qiao S. Novel metabolic and physiological functions of branched chain amino acids: a review. Journal of animal science and biotechnology. 2017;8:10. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40104-016-0139-z>
8. Zayko O. A., Korotkevich O. S., Petukhov V. L. Macroand trace elements accumulation in pigs precocious meet breed (CM-1) liver and their correlations with amino acids' level in blood serum. *Doklady Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk*. 2013;(5):51–53. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=qzeyjl>
9. Iltaykov A. V., Mikolaychik I. N., Morozova L. A., Stupina E. S. Method of increasing biological value of muscle and fat fever. *Agrarnyy vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals. 2015;6(136):34–37. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24000585>
10. Zhang F., Zheng W., Xue Y., Yao W. Suhuai suckling piglet hindgut microbiome-metabolome responses to different dietary copper levels. Applied microbiology and biotechnology. 2019;103:853–868. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9533-0>
11. Aymerich P., Tokach M. D., Dritz S. S., Gasa J., Coma J., Solà-Oriol D. Lysine requirements of finishing boars and gilts: A meta-analysis. Animal. 2021;15(5):100218. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100218>
12. He L., Yang H., Hou Y., Li T., Fang J., Zhou X. et al. Effects of dietary L-lysine intake on the intestinal mucosa and expression of CAT genes in weaned piglets. Amino acids. 2013;45(2):383–391. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00726-013-1514-0>
13. Ball R. O. Threonine requirement and the interaction between threonine intake and gut mucins in pigs. Symposium of the 2001 Degussa, Banff Pork Seminar. Banff, Alberta, Canada. 2001.
14. Defa L., Changting X., Shiyang Q., Jinhui Z., Johnson E. W., Thacker P. A. Effects of dietary threonine on performance, plasma parameters and immune function of growing pigs. Animal Feed Science and Technology. 1999;78(3-4):179–188. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(99\)00005-X](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(99)00005-X)
15. Gondret F., Le Floc'h N., Batonon-Alavo D. I., Perruchot M.-H., Mercier Y., Lebret B. Flash dietary methionine supply over growth requirements in pigs: Multi-faceted effects on skeletal muscle metabolism. Animal. 2021;15(7):100268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100268>
16. Conde-Aguilera J. A., Cobo-Ortega C., Mercier Y., Tesseraud S., Van Milgen J. The amino acid composition of tissue protein is affected by the total sulfur amino acid supply in growing pigs. Animal. 2014;8(3):401–409. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1751731113002425>
17. Petukhova M. A. Amino acid composition and biological value of proteins in the meat of different-genotype pigs. *Doklady Natsional'noy akademii nauk Belarusi*. 2015;59(2):118–123. (In Belarus). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23569420>
18. Sorapukdee S., Narunatsopanon S. Comparative study on compositions and functional properties of porcine, chicken and duck blood. Korean journal for food science of animal resources. 2017;37(2):228–241. DOI: <https://doi.org/10.5851/kosfa.2017.37.2.228>

19. Solyanik S. V., Solyanik V. V., Solyanik A. V. Zoohygienic and zootechnical reference values of morphological, biochemical, and immunological parameters of blood and the level of natural resistance in pigs. *Aktual'nye problemy intensivnogo razvitiya zhivotnovodstva*. 2019;(22-2):248–255. (In Russ.).

URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39153375>

20. Gusev I. V., Rykov R. A., Bogolyubova N. V. Reference intervals of biochemical parameters in pigs. *Veterinariya i kormlenie*. 2017;6:31–33. (In Russ.).

21. Malinovskiy A. V. Differences of histidine conversion in human and other mammals. *Tsitologiya*. 2021;63(4):403–408. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0041377121040076>

22. Wadud S., Onodera R., Or-Rashid M. M. Synthesis of histidine in liver and kidney of cattle and swine. *Animal Science Journal*. 2001;72(3):253–256. DOI: <https://doi.org/10.2508/chikusan.72.253>

23. P'yankova E. V., Erimbetov K. T., Dudin V. I. Assessment of protein nutrition in growing pigs and construction of feed supplement with amino acid composition identical to that in the wall of small intestine. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh* = Problems of Productive Animal Biology. 2015;(1):84–95. (In Russ.).

URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23379437>

Сведения об авторах

Колесник Никита Сергеевич, младший научный сотрудник отдела физиологии и биохимии сельскохозяйственных животных, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста», пос. Дубровицы, д. 60, г.о. Подольск, Московская область, Российская Федерация, 142132, e-mail: vijinfo@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4267-5300>

Сивкина Ольга Николаевна, младший научный сотрудник отдела физиологии и биохимии сельскохозяйственных животных, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста», пос. Дубровицы, д. 60, г. о. Подольск, Московская область, Российская Федерация, 142132, e-mail: vijinfo@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3831-4412>

✉ **Воронина Оксана Александровна**, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник отдела физиологии и биохимии сельскохозяйственных животных, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста», пос. Дубровицы, д. 60, г. о. Подольск, Московская область, Российская Федерация, 142132, e-mail: vijinfo@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6774-4288>, e-mail: voroninaok-senia@inbox.ru

Савина Анастасия Анатольевна, младший научный сотрудник отдела физиологии и биохимии сельскохозяйственных животных, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста», пос. Дубровицы, д. 60, г. о. Подольск, Московская область, Российская Федерация, 142132, e-mail: vijinfo@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0257-1643>

Зайцев Сергей Юрьевич, доктор биол. наук, доктор хим. наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела физиологии и биохимии сельскохозяйственных животных, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста», пос. Дубровицы, д. 60, г. о. Подольск, Московская область, Российская Федерация, 142132, e-mail: vijinfo@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1533-8680>

Information about the authors

Nikita S. Kolesnik, junior researcher, the Department of Physiology and Biochemistry of Farm Animals, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L. K. Ernst, Dubrovitsy village, 60, Podolsk City District, Moscow Region, Russian Federation, 142132, e-mail: vijinfo@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4267-5300>

Olga N. Sivkina, junior researcher, the Department of Physiology and Biochemistry of Farm Animals, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L. K. Ernst, Dubrovitsy village, 60, Podolsk City District, Moscow Region, Russian Federation, 142132, e-mail: vijinfo@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3831-4412>

✉ **Oksana A. Voronina**, PhD in Biological Science, senior researcher, the Department of Physiology and Biochemistry of Farm Animals, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L. K. Ernst, Dubrovitsy village, 60, Podolsk City District, Moscow Region, Russian Federation, 142132, e-mail: vijinfo@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6774-4288>, e-mail: voroninaok-senia@inbox.ru

Anastasia A. Savina, junior researcher, the Department of Physiology and Biochemistry of Farm Animals, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L. K. Ernst, Dubrovitsy village, 60, Podolsk City District, Moscow Region, Russian Federation, 142132, e-mail: vijinfo@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0257-1643>

Sergey Yu. Zaytsev, DSc in Biological Science, DSc in Chemical Science, professor, leading researcher, the Department of Physiology and Biochemistry of Farm Animals, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L. K. Ernst, Dubrovitsy village, 60, Podolsk City District, Moscow Region, Russian Federation, 142132, e-mail: vijinfo@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1533-8680>

✉ – Для контактов / Corresponding author



Продуктивные и функциональные признаки первотелок трех генотипов при разных системах доения

© 2025. Г. Н. Левина✉, А. И. Назаренко

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста», пос. Дубровицы, Московская область, Российская Федерация

Цель – выявить лучшие генотипы симментальской породы для ее совершенствования. Из первотелок трех генотипов племенного завода по разведению симментальской породы Курской области в 2019–2022 гг. сформировали группы пар-аналогов по доле крови симментальской (СИМ), монбельярдской (МБ), голштинской (ГШ) пород (генотипы: 25%СИМ75%ГШ; 50%СИМ50%ГШ и 50%МБ25%СИМ25%ГШ). При доении на роботах животных каждого генотипа было по 140 голов, на линейной установке (ЛУ) – по 70. Упитанность оценивали при взвешивании животных ($n = 20$). Реакцию на раздражитель определяли ($n = 20$) с пятикратным повторением. Индекс осеменения рассчитывали по данным зоотехнического учета по отношению числа выполненных осеменений к плодотворным. Установили, что живая масса и упитанность выше у дочерей МБ быков при доении на роботах на 15 кг ($p < 0,05$) и 0,68 балла ($p < 0,01$), на ЛУ – на 8 кг ($p < 0,05$) и 0,75 балла ($p < 0,01$) в сравнении со сверстницами генотипа 25%СИМ75%ГШ. Индексы осеменения дочерей МБ быков и первотелок с долей крови 50%ГШ были лучше, чем у сверстниц генотипа 25%СИМ75%ГШ на 0,17 ($p < 0,001$) и 0,13 ($p < 0,001$) единицы при доении коров на роботах и на 0,34 ($p < 0,001$) и 0,31 ($p < 0,001$) – при доении на линейной установке. Дочери МБ быков по сумме молочного жира и белка превосходили сверстниц генотипов 25%СИМ75%ГШ и 50%СИМ50%ГШ при доении на роботах на 31,3 и 55,6 кг, на ЛУ – на 39,9 и 54,8 кг соответственно. Реакция на раздражитель животных с долей крови 75%ГШ, в сравнении со сверстницами генотипов 50%СИМ50%ГШ и 50%МБ25%СИМ25%ГШ, при доении на роботах выше на 22 и 16 %, на ЛУ – на 23 и 16 %. При доении на роботах выбыло коров с долей крови 50%ГШ и 75%ГШ по 8 % (дочерей МБ быков – 5 %), на ЛУ – 75%ГШ – 21 %, а генотипов 50%СИМ50%ГШ и 50%МБ25%СИМ25%ГШ – 15 и 16 %. Для улучшения симментальской породы приоритетным является генотип 50%МБ25%СИМ25%ГШ относительно генотипов 25%СИМ75%ГШ и 50%СИМ50%ГШ, так как у животных лучшие показатели: по сумме молочного жира и белка при доении роботами – +31,3 и +55,6 кг, на ЛУ – +39,9 и +54,8 кг, индексу осеменения – -0,17 и -0,04; -0,34 и +0,03 единицы, упитанности – +0,75 и +0,21; +0,68 и +0,18 балла, реакции на раздражитель – -23 и -16 %; -22 и -7 %, выбытию после 1-й лактации – -3 и -3 %; -5 и +1 % соответственно.

Ключевые слова: симментальская, монбельярдская, голштинская породы, продуктивность, роботодоение, реакция на стресс, выбытие

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста» (тема: №FGGN-2024-0013).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Левина Г. Н., Назаренко А. И. Продуктивные и функциональные признаки первотелок трех генотипов при разных системах доения. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(4):885–895.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.885-895>

Поступила: 13.02.2025

Принята к публикации: 12.08.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

Productive and functional traits of first-calf heifers of three genotypes by different systems of milking

© 2025. Galina N. Levina✉, Alexander I. Nazarenko

Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L. K. Ernst, pos. Dubrovitsy, Moscow region, Russian Federation

The aim of the study was to identify the most promising genotypes of the Simmental breed for its genetic improvement. Between 2019 and 2022, groups of analog pairs were formed from first-calf heifers of three genotypes at a Simmental breeding farm in the Kursk region, based on the proportion of Simmental (SIM), Montbéliarde (MB), and Holstein (HOL) breeds (genotypes: 25%SIM75%HOL; 50%SIM50%HOL; and 50%MB25%SIM25%HOL). Each genotype group consisted of 140 animals milked with robotic systems and 70 animals milked using a linear milking system (LMS). Body condition was assessed during weighing ($n = 20$). The animals' response to a stimulus was measured ($n = 20$) with five repetitions. The insemination index was calculated based on zootechnical records as the ratio of total inseminations to successful ones. It was found that live weight and body condition were higher in the daughters of MB bulls: by 15 kg ($p < 0.05$) and 0.68 points ($p < 0.01$) during robotic milking, and by 8 kg ($p < 0.05$) and 0.75 points ($p < 0.01$) on the LMS, compared to peers of the 25%SIM75%HOL genotype. The insemination indices of daughters of MB bulls and first-calf heifers with 50%HOL blood were better than those of animals with 25%SIM75%HOL by 0.17 ($p < 0.001$) and 0.13 ($p < 0.001$) during robotic milking, and by 0.34 ($p < 0.001$) and 0.31

($p < 0.001$) on the LMS. In terms of combined milk fat and protein yield, the daughters of MB bulls outperformed peers of the 25%SIM75%HOL and 50%SIM50%HOL genotypes by 31.3 and 55.6 kg, respectively, during robotic milking, and by 39.9 and 54.8 kg, respectively, on the LMS. Animals with 75%HOL blood showed a stronger reaction to stimuli – 22 and 16 % higher during robotic milking, and 23 and 16 % higher on the LMS—compared to peers with 50%SIM50%HOL and 50%MB25%SIM25%HOL genotypes. Culling rates after the first lactation under robotic milking were 8 % for cows with 50 and 75%HOL blood (5 % for daughters of MB bulls), and under LMS: 21 % for 75%HOL, 15 % for 50%SIM50%HOL, and 16% for 50%MB25%SIM25%HOL genotypes. Therefore, the 50%MB25%SIM25%HOL genotype is considered the most promising for improving the Simmental breed, compared to 25%SIM75%HOL and 50%SIM50%HOL genotypes, due to superior results in: combined milk fat and protein yield (robotic milking: +31.3 and +55.6 kg; LMS: +39.9 and +54.8 kg), insemination index (-0.17 and -0.04; -0.34 and +0.03), body condition (+0.75 and +0.21; +0.68 and +0.18 points), reaction to stimuli (-23 and -16 %; -22 and -7 %), and lower culling rates after the first lactation (-3 and -3 %; -5 and +1 %, respectively).

Keywords: Simmental, Montbéliard, Holstein breeds, genotypes, milk production, robotic milking, stress response, disposal

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 Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L. K. Ernst (theme No. FGGN-2024-0013).

The authors thank the reviewers for their contribution to the expert assessment of this work.

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

For citation: Levina G. N., Nazarenko A. I. Productive and functional traits of first-calf heifers of three genotypes by different systems of milking. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):885–895. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.885-895>

Received: 13.02.2025

Accepted for publication: 12.08.2025 Published online: 29.08.2025

Разведение крупного рогатого скота молочного направления продуктивности направлено на совершенствование животных, изучение существующих и разработку новых приемов, ведущих к овладению процессом их эволюции. Что касается симментальской породы, то для улучшения продуктивных качеств на протяжении нескольких десятилетий ее совершенствовали голштинской породой. Это положительно повлияло на увеличение молочной продуктивности. Но продолжительное, а зачастую бессистемное использование голштинов привело к потере у потомков симментальской породы положительных признаков, присущих ей, так как улучшающая её голштинская была отселекционирована на достижение высокой молочной продуктивности коров, что снижало воспроизводство, ухудшало здоровье, ослабляло крепость конституции и сохранность животных [1].

В настоящее время товаропроизводители при производстве молока все более фокусируют внимание на функциональных признаках, таких как долголетие. Слишком ранняя вынужденная выбраковка животных увеличивает расходы на выращивание молодняка, повышая тем самым себестоимость продукции, уменьшая эффективность отбора телок для ремонта стада и резко снижая возможность оценки племенных животных по качеству потомства. Сохранность является важным аспектом в современной селекции крупного рогатого скота по всему миру. В этой связи и здоровье становится критерием характеристики стад, так как эффективность производства зависит от снижения затрат на лечение животных [2].

Молочное скотоводство всего мира после периода интенсивного разведения, ориентированного на высокие удои коров, стало смещать акцент в селекции животных на сохранность и адаптацию к новым технологиям. В последние годы происходящие изменения в организационно-экономических формах ведения сельского хозяйства в агропромышленном комплексе России вызывают необходимость внедрения в производство продукции животноводства новых технологий, позволяющих повышать эффективность молочного скотоводства.

Сложившиеся обстоятельства вызвали необходимость изучения и выявления эффективных приёмов селекции крупного рогатого скота, разработкой и поиском которых озадачены учёные разных стран с развитым молочным скотоводством [3].

В прошедшее десятилетие в нашей стране при разведении симментальской породы, имеющей высокую кровность по голштинской, начали использовать монбельярдскую породу. Основанием для этого было общее происхождение симментальской породы с монбельярдской. Кроме того, монбельярдская порода отселекционирована на более долголетнее продуктивное использование. В европейских странах, Северной Америке и Китае уже имеется положительная практика совершенствования симментальской породы быками монбельярдской. Потомство, полученное от скрещивания симментальской и монбельярдской пород, по сравнению с животными симментальской, проявляло более раннюю зрелость и высокую молочную продуктивность [4, 5].

Интенсификация молочного скотоводства смещает цель искусственного отбора животных в сторону повышения эффективности производства. При этом новые генотипы (с учетом доли крови каждой породы), которые сформированы при совершенствовании симментальской породы голштинской и другими породами, должны быть оценены на современных технологиях и выявлены лучшие для дальнейшего использования.

В настоящее время таковой является автоматическая или роботизированная система доения. Учитывая, что технология дорогая, а информации о влиянии на эффективность доения молочного скота разных пород и генотипов в нашей стране мало, очень важно проводить детальные исследования. Веским аргументом в пользу внедрения роботов является и забота о здоровье обслуживающего персонала [6]. В отличие от традиционного доения компьютеризированный мониторинг при доении на роботах позволяет онлайн получать и обрабатывать информацию об отдельных коровах с беспрецедентной детализацией данных [7].

При оценке результатов доения коров на роботах необходимо обращать внимание не только на надой и качество молока, но и на изменения в живой массе, поведении, поскольку коровы должны самостоятельно идти на доение, что требует особого внимания к темпераменту, к таким чертам характера, как пугливость, активность, общительность [8].

Установка роботов не только меняет порядок работы, но, что более важно, позволяет каждой корове проявлять свое естественное поведение. Поэтому фермерам требуется скот с «хорошим темпераментом», чтобы коровы не «сдерживали» выработку молока из-за подавления секреции окситоцина, гормона, который является основным медиатором рефлекса выделения молока [9].

Программы селекции, направленные на отбор скота для конкретной продукции (молока или мяса), должны быть ориентированы и на включение показателя по оценке темперамента, что может повлиять на поведенческие характеристики поголовья, их генетическую изменчивость.

Крупный рогатый скот – это животные, которые боятся новизны, но привыкают. У них хорошая память, их легче обслуживать, если они привыкли к мягкому обращению; с животными, обращение с которыми было грубое, работать

сложнее. Коровы могут подключаться к доильному роботу в любое время и, следовательно, интервал между дойками не является фиксированным. Сообщалось, что частота, с которой коровы предпочитают доиться, колеблется от 1 до 5 раз в день. Автоматизированное доение (AMS) позволяет доить коров чаще, чем при обычных системах, что обеспечивает более высокие надой молока. Для получения наивысшего удоя на одну корову в день необходимо учитывать, что стадо должно состоять из высокопродуктивных коров. Самую высокую эффективность достигали при обслуживании коров, которые давали более 45 кг молока в день и доились менее четырех раз [10].

Отмечается, что при доении на роботах в фермерских хозяйствах Канады у всех коров была более высокая средняя частота доения, надой молока и лучше репродуктивные показатели [11]. В России доение на роботах осуществляется менее чем у 3 % коров от общего их поголовья, в линейный молокопровод – у 51 %¹.

Актуальность исследований определяется тем, что первотелки трех генотипов симментальской породы изучены в сравнительном аспекте: при доении на роботах и линейной установке (ЛУ), так как это необходимо для расширения знаний и выявления оптимальных генотипов симментальской породы для ее совершенствования при сравнении доения на разных системах.

Цель исследований – определить перспективные генотипы для совершенствования симментальской породы по живой массе, продуктивности, реакции на раздражитель, индексу осеменения и выбытию первотелок при доении на роботах и линейной установке.

Научная новизна – на маточном поголовье симментальской породы с удоем в среднем более 8000 кг молока получены новые генотипы первотелок, имеющие как разный процент кровности по допустимой к использованию голштинской породы (25%СИМ75%ГШ; 50%СИМ50%ГШ), так и животные, имеющие в генотипе 50 % кровности по родственной монбельярдской (50%МБ25%СИМ25%ГШ). У первотелок полученных генотипов изучены живая масса и упитанность, продуктивность и индекс осеменения, реакция на раздражитель и выбытие при доении на роботах и линейной установке.

¹Ежегодник по племенной работе в молочном скотоводстве в хозяйствах РФ (2023 год). М.: изд-во ФГБНУ ВНИИплем, 2024. 242 с. URL: <https://vniipleм.ru/wp-content/uploads/2024/07/Ежегодник.Мол.Скотоводство.2024-1.pdf>

Материал и методы. Исследования проводили на базе стада симментальской породы племенного завода «Сапфир-Агро» Курской области, где были созданы генотипы животных с использованием маточного поголовья, имеющего 75 % кровности по голштинской породе (красной масти) и менее.

Создавая генотипы, исходили из возможности оценить их для определения перспективы совершенствования симментальской породы: повышая кровность по голштинам до максимально допустимого уровня (25%СИМ75%ГШ), который, согласно рекомендациям Евразийской экономической комиссии, отмечен как минимально допустимый в симментальской породе или использовать быков родственной симменталам монбельярдской породы на маточном поголовье (♀50%СИМ50%ГШ) для получения потомков генотипа ♀50%МБ25%СИМ25%ГШ (в генотипах животных указана кровность по проценту доли крови пород).

При изучении первотелок, имеющих разную кровность по симментальской (СИМ) породе и улучшающей ее голштинской (ГШ), а также первотелок, полученных от быков монбельярдской (МБ) породы, были подобраны сверстницы трех генотипов: 25%СИМ75%ГШ; 50%СИМ50%ГШ и 50%МБ25%СИМ25%ГШ, которых вводили в стадо в 2019–2022 гг. по принципу пар-аналогов по следующим признакам: дата рождения; сезон отела; возраст при 1 отеле ($\pm 1,0$ мес.).

Роботизированное доение коров проводили на роботах компании Lely (Голландия), доение на ЛУ – 2-кратное в молокопровод. Молочную продуктивность при доении на роботах определяли по 140 первотелкам каждого генотипа, по 70 – при доении на ЛУ в молокопровод.

Кормление коров при рассматриваемых системах доения (роботами и на линейной установке) было одинаковым и осуществлялось по принятой на предприятии программе кормления, которая составляется в соответствии с возрастом, уровнем продуктивности, массой тела и физиологическим состоянием животных.

Расчет достоверности различий был выполнен при сравнении животных двух генотипов (50%МБ25%СИМ25%ГШ и 50%СИМ

50%ГШ) с генотипом, который согласно рекомендации Евразийской экономической комиссии, является минимально допустимым по кровности в симментальской породе – 25%СИМ75%ГШ.

По Решению Коллегии Евразийской экономической комиссии №108 от 08.09.2020 г. «Об утверждении Порядка определения породы (породности) племенных животных» коровы изучаемых генотипов относятся к симментальской породе.

Определение живой массы первотелок (в группах по 20 животных) проводили путём взвешивания на электронных весах на 3-4 месяце лактации, в этот период определяли и упитанность (с интервалом по оценке в баллах $0,25$)².

Крупный рогатый скот, как вид, испытывает врожденный страх перед незнакомым человеком, его движениями, ситуацией. Примером типа поведения при попытке контакта незнакомого человека с животным чаще бывает проявление спокойного интереса или резкая реакция, стремление отойти от человека. Поэтому для определения реакции на раздражитель использовали методику [12], согласно которой проводили проверку реакции на незнакомого человека при подходе к животному на расстояние вытянутой руки. Фиксировали и регистрировали поведение первотелок посредством наблюдения – проявляет реакцию на «раздражитель» или остается спокойным. Проводили исследования на 3-4 месяце лактации с пятикратной повторностью: при скармлировании кормосмеси и концентрированного корма – при доении на ЛУ, при доении на роботах – только при раздаче кормосмеси, так как базовая часть комбикорма включена в кормосмесь, а разницу, с учетом удоя, давали при доении на роботах.

Расчет выбытия животных проводили, используя данные селекционно-зоотехнических документов предприятия. Индекс осеменения рассчитывали на основании данных зоотехнического учета по отношению числа выполненных осеменений к результативным. Показатели спермопродукции быков-производителей, используемых на маточном поголовье крупного рогатого скота предприятия, соответствовали ГОСТ 26030-2015 «Средства воспроизводства. Сперма быков замороженная. Технические условия».

²URL: <https://vniiplem.ru/wp-content/uploads/2024/07/Ежегодник.Мол.Скотоводство.2024-1.pdf>

Статистическая обработка полученных данных проведена по общепринятым методам вариационной статистики с использованием программного пакета анализа *Microsoft Excel 2010*; «±» в таблицах показывает ошибку средней арифметической, достоверность показателей оценивали по критерию Стьюдента при $p < 0,001$; $p < 0,01$; $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение. По окончании исследований установили, что живая масса и упитанность на 3-4 месяцах лактации, в период раздоя, были достоверно больше у дочерей быков монбельярдской породы

в сравнении с животными, имеющими максимально допустимую кровность по голштинской породе (25%СИМ75%ГШ): при доении на ЛУ – на 8 кг ($p < 0,05$) и на 0,75 балла ($p < 0,01$), при доении на роботах – на 15 кг ($p < 0,05$) и 0,68 балла ($p < 0,01$). Сверстницы с максимальной кровностью по симментальской породе (50%СИМ50%ГШ) имели также достоверное превосходство над животными генотипа 25%СИМ75%ГШ, но лишь по упитанности: при доении на ЛУ – на 0,54 ($p < 0,05$), при доении на роботах – на 0,5 балла ($p < 0,05$) (табл. 1).

Таблица 1 – Живая масса и упитанность коров 1-й лактации (n = 20) /

Table 1 – Live weight and fatness of cows of the 1st lactation (n =20)

Система доения / Milking system	Генотип / The genotype					
	25%СИМ75%ГШ / 25%SIM75% HOL		50%МБ25%СИМ25%ГШ / 50% MB25%SIM25% HOL		50%СИМ50%ГШ / 50%SIM50% HOL	
	живая масса, кг / live weight, kg	упитанность, балл / body condition, points	живая масса, кг / live weight, kg	упитанность, балл / body condition, points	живая масса, кг / live weight, kg	упитанность, балл / body condition, points
2-кратное / 2-fold	572±6,7	3,0±0,29	580±8,2*	3,75±0,31**	572±4,9	3,54±0,18*
На роботах / By robots	573±6,4	3,07±0,29	588±6,5*	3,75±0,31**	574±4,3	3,57±0,21*

Примечания: 1. Уровни статистической достоверности при: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. 2. Достоверность данных по генотипам первотелок: 50%МБ25%СИМ25%ГШ и 50%СИМ 50%ГШ рассчитана относительно генотипа 25%СИМ75%ГШ. 3. Доли крови пород в генотипах: 25%СИМ75%ГШ (25 % симментальской и 75 % голштинской; 50%СИМ50%ГШ (50 % симментальской и 50 % голштинской); 50%МБ25%СИМ25%ГШ (50 % монбельярдской, 25 % симментальской и 25 % голштинской)

Notes: 1. Levels of statistical confidence in: * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. 2. The reliability of data on animal genotypes: 50% MB25%SIM25%HOL and 50%SIM50%HOL is calculated relative to the genotype of 25%SIM75%HOL. 3. The proportion of blood of the breeds in the genotypes: 25%SIM75% HOL (25 % Simmental and 75 % Holstein); 50%SIM50%HOL (50 % Simmental and 50 % Holstein); 50% MB25%SIM25%HOL (50 % Montbéliard, 25 % Simmental and 25 % Holstein)

Доение на разных системах (табл. 2) практически не сказалось на массовой доле белка в молоке, но массовая доля жира при доении на роботах была выше, чем при доении на ЛУ у коров с кровностью по голштинам 75 % на 0,07 п. п., у коров с кровностью по голштинам 50 % – на 0,12 п. п. ($p < 0,001$). У дочерей монбельярдских быков при доении на роботах отмечено снижение массовой доли жира на 0,09 п. п. ($p < 0,001$), однако у них относительно сверстниц была и наибольшая его величина при обоих вариантах доения (4,23 и 4,32 %). В целом первотелки этого генотипа по сумме молочного жира и белка превосходили сверстниц с большей и меньшей кровностью по голштинам (25%СИМ75%ГШ и 50%СИМ50%ГШ) при доении на роботах на 31,3 и 55,6 кг, при доении на ЛУ – на 39,9 и 54,8 кг соответственно.

В технологическом процессе производства молока в настоящее время на первом месте стоит вопрос воспроизводства, так как при отсутствии расширенного воспроизводства отечественному скотоводству трудно выйти из состояния стагнации. Кроме того, основными причинами выбраковки высокопродуктивного молочного скота чаще являются нарушения репродуктивной функции. Проведенный анализ показал, что индексы осеменения у дочерей монбельярдских быков и сверстниц с меньшей кровностью по голштинской породе (50 %) как при доении на роботах, так и на ЛУ были оптимальными и достоверно отличались от величины первотелок генотипа 25%СИМ75%ГШ, хотя у всех первотелок значения индекса осеменения несколько увеличивались при доении на ЛУ, но значительно – у первотелок с кровностью по голштинской породе 75 % – на 0,31 п. п.

Таблица 2 – Молочная продуктивность и индекс осеменения первотелок трех генотипов /
 Table 2 – Milk productivity and insemination index of first heifers of three genotypes

Генотип первотелок / The genotype of the first heifers	Удой, кг / Milk yield, kg	Массовая доля жира, % / Mass fraction of fat, %	Массовая доля белка, % / Mass fraction of protein, %	Молочный жир + молочный белок, кг / Milk fat + milk protein, kg	Индекс осеменения / Insemination index
При доении на роботах (n = 140) / When milking with robots (n = 140)					
25%СИМ75%ГШ / 25%SIM75% HOL	7778 ±81,4	4,08±0,02	3,28±0,01	572,4	1,54±0,05
50%МБ25%СИМ25%ГШ / 50% MB25%SIM25% HOL	7851±85,6	4,23±0,02***	3,46±0,03***	603,7	1,37±0,04***
50%СИМ50%ГШ / 50%SIM50% HOL	7241±64,8***	4,19±0,01***	3,38±0,03***	548,1	1,41±0,04**
При доении на линейной установке (n = 70) / When milking on a linear installation (n = 70)					
25%СИМ75%ГШ / 25%SIM75% HOL	7516±73,8	4,01±0,02	3,28±0,02	547,9	1,85±0,06
50%МБ25%СИМ25%ГШ / 50%MB25%SIM25% HOL	7575±81,2	4,32±0,02***	3,44±0,03***	587,8	1,51±0,05***
50%СИМ50%ГШ / 50%SIM50% HOL	7155±69,4***	4,07±0,01***	3,38±0,02***	533,0	1,54±0,05***

Примечания: См. к таблице 1 / Notes: Refer to table 1

Оценка реакции коров на раздражитель при доении на ЛУ в период скормливания кормосмеси показала, что животные трёх генотипов различались по этому показателю. Первотелок с кровностью по голштинской породе 75 % (25%СИМ75%ГШ) реагировало на раздражитель большее количество, чем сверстниц генотипа 50%СИМ50%ГШ на 16 %, а относительно генотипа 50%МБ25%СИМ25%ГШ – на 22 %. При проверке реакции на раздражитель, при скормливания комбикорма, коровы всех генотипов реагировали реже, так как комбикорм они едят с максимальной увлеченностью, но характер реакции был таким же – из числа коров с долей крови 75%ГШ реагировало на раздражитель на 7 % больше, чем животных генотипа 50%СИМ50%ГШ и на 11 %, чем первотелок генотипа 50%МБ25%СИМ25%ГШ (табл. 3).

Реакцию на раздражитель при доении на роботах (табл. 4) определяли только при скормливания кормосмеси. Реакция в целом отмечена у меньшего процента коров: с долей крови 75%ГШ – 67 % животных; 50%ГШ – 51 % реагировали на раздражитель, у дочерей быков монбельярдской породы (50%МБ25%СИМ25%ГШ) – 44 %, что меньше, чем при доении на ЛУ соответственно на 5 %, 5 и 6 %. Реакция на раздражитель у первотелок трех генотипов при доении на роботах интенсивнее начала снижаться с третьей проверки, а при доении на линейной установке – с четвертой.

Ввод первотелок в стадо в период исследований был высоким, поскольку появилась возможность увеличения поголовья за счет собственного воспроизводства: на комплексе с автоматическим доением роботами – 37–39 %, в стаде, на ЛУ – 34–36 % (табл. 5). Процент выбытия зафиксирован наименьший у дочерей монбельярдских быков: при доении на роботах – 5 %, при доении на линейной установке – 16 %, в том числе по незаконченной лактации – 2 и 4 % соответственно. При доении на роботах у первотелок с кровностью по голштинской породе 50 и 75 % (генотипы 50%СИМ50%ГШ и 25%СИМ75%ГШ) выбытие было на одинаковом уровне – по 8 %, на линейной установке – 15 и 21 % соответственно.

При интенсивном производстве молока важно знать все нюансы реакции организма, обусловленные как влиянием факторов внешней среды, так и наследственностью. Учитывая, что на симментальской породе негативно сказалось продолжительное использование быков голштинской породы, которая была отселекционирована на достижение высокой молочной продуктивности коров, что снижало у потомства фертильность и сохранность, сложившиеся обстоятельства вызвали необходимость создания и выявления генотипов животных, которые бы стали основой для совершенствования симментальской породы. Кроме того, на перспективу необходима и оценка животных новых генотипов для использования их с применением современных технологий. Таковой в настоящее время является автоматическое доение.

Таблица 3 – Проявление реакции на раздражитель первотелками при доении на линейной установке (n = 20), % /
Table 3 – Manifestation of the reaction to the stimulus by the first heifers during milking on a linear installation (n = 20), %

Вид корма / Type of feed	Порядковый № проверки на раздражитель / Serial number of the stimulus test	25%СИМ75%ГПШ / 25%SIM75%HOL	50%МБ25%СИМ25%ГПШ / 50%MB25%SIM25%HOL	50%СИМ50%ГПШ / 50%SIM50%HOL	50%МБ25%СИМ25%ГПШ / ± k 25%СИМ75%ГПШ / 50%МБ25%СИМ25%HOL ± k 25%СИМ75%HOL	50%СИМ50%ГПШ ± k 25%СИМ75%ГПШ / 50%SIM50%HOL ± k 25%СИМ75%HOL
Кормосмесь / Feed mixture	1	78	58	70	-20	-8
	2	78	54	60	-24	-18
	3	72	50	56	-22	-16
	4	66	44	48	-22	-18
	5	64	42	46	-22	-18
Комбикорм / Grain feed	Среднее / Average	72	50	56	-22	-16
	1	28	16	20	-12	-8
	2	26	16	20	-10	-6
	3	24	14	18	-10	-6
	4	24	14	18	-10	-6
Кормосмесь / Feed mixture	5	24	12	16	-12	-8
	Среднее / Average	25	14	18	-11	-7

Таблица 4 – Проявление реакции на раздражитель первотелками при доении роботом (n = 20), % /
Table 4 – Manifestation of the reaction to the stimulus by the first heifers during milking by robots (n = 20), %

Вид корма / Type of feed	Порядковый № проверки на раздражитель / Serial number of the stimulus test	25%СИМ75%ГПШ / 25%SIM75%HOL	50%МБ25%СИМ25%ГПШ / 50%MB25%SIM25%HOL	50%СИМ50%ГПШ / 50%SIM50%HOL	50%МБ25%СИМ25%ГПШ / ± k 25%СИМ75%ГПШ / 50%МБ25%СИМ25%HOL ± k 25%СИМ75%HOL	50%СИМ50%ГПШ ± k 25%СИМ75%ГПШ / 50%SIM50%HOL ± k 25%СИМ75%HOL
Кормосмесь / Feed mixture	1	72	49	61	-23	-11
	2	72	48	57	-24	-15
	3	64	43	48	-21	-16
	4	63	41	44	-22	-19
	5	63	40	43	-23	-20
Кормосмесь / Feed mixture	Среднее / Average	67	44	51	-23	-16

Примечание: Доли крови пород в генотипах: 25%СИМ75%ГПШ (25 % симментальской и 75 % голштинской); 50%СИМ50%ГПШ (50 % симментальской и 50 % голштинской); 50% МБ25%СИМ25%ГПШ (50 % монбельярдской, 25 % симментальской и 25 % голштинской) /
Note: The proportion of blood of the breeds in the genotypes: 25%SIM75%HOL (25 % Simmental and 75 % Holstein); 50%SIM50%HOL (50 % Simmental and 50 % Holstein); 50% МБ25%СИМ25%HOL (50 % Montbéliard, 25 % Simmental and 25 % Holstein).

Таблица 5 – Выбытие первотелок трех генотипов при доении на роботах и линейной доильной установке /
Table 5 – The culling rates of the first heifers of three genotypes during milking with robots and on a linear milking machine

Показатель / Indicator	25%СИМ75%ГШ / 25%SIM75% HOL		50%МБ25%СИМ25%ГШ / 50%MB25%SIM25% HOL		50%СИМ50%ГШ / 50%SIM50% HOL	
	голов / number of animals	%	голов / number of animals	%	голов / number of animals	%
При доении на роботах / When milking by robots						
Ввод первотелок в стадо / Introducing the first heifers into the herd	53	37	60	39	79	39
Выбыло по 1 лактации / 1 lactation was eliminated	4	8	3	5	6	8
в т.ч. по не законченной / of these, 1 lactation is incomplete	2	4	1	2	2	3
При доении на линейной установке / When milking on a linear machine						
Ввод первотелок в стадо / Introducing the first heifers into the herd	42	36	49	34	48	35
Выбыло по 1 лактации / 1 Lactation was eliminated	9	21	8	16	7	15
в т.ч. по не законченной / of these, 1 lactation is incomplete	2	5	2	4	3	6

Примечание: Доли крови пород в генотипах: 25%СИМ75%ГШ (25 % симментальской и 75 % голштинской; 50%СИМ50%ГШ (50 % симментальской и 50 % голштинской); 50% МБ25%СИМ25%ГШ (50 % монбельярдской и 25 % симментальской, 25 % голштинской) /

Note: The proportion of blood of the breeds in the genotypes: 25%SIM75%HOL (25 % Simmental and 75 % Holstein; 50%SIM50%HOL (50 % Simmental and 50 % Holstein); 50% MB25%SIM25%HOL (50 % Montbéliard, 25 % Simmental and 25 % Holstein).

И. М. Донник, О. Г. Лоретц, О. С. Чеченихина, О. А. Быкова, А. В. Степанов [13] делают акцент на том, что устойчивость к стрессам у коров зависит от возраста, упитанности и наследственности. Н. Д. Виноградова, Р. В. Падерина [14] отмечают, что при использовании практически новой технологии, как доение коров на роботах, где предполагается «самообслуживание» животного, возможность в свободе выбора срока и частоты посещений доильного бокса, поэтому для повышения эффективности использования роботов-дойаров необходимо проводить оценку и отбор животных по темпераменту. Результаты наших исследований по изучению реакции на раздражитель коровами-первотелками трех генотипов вполне согласуются с выводами ученых. Так, потомки монбельярдских быков менее всего реагировали на раздражитель в сравнении с первотелками, имеющими кровность по голштинской породе 75 и 50 %. При более спокойном нраве у дочерей монбельярдских быков была лучшая упитанность, оптимальный индекс осеменения и меньший процент выбытия.

Важным фактором является и развитие цифровых технологий при доении коров на роботах, что определяет точность анализа данных, создает возможность делать обоснованные выводы, как отмечают В. Н. Суровцева, Ю. Н. Никулина [15]. Кроме того, высокая эффективность роботов достигается при выборе хозяйствами стратегии, в наибольшей степени использующей их преимущества, а именно: возможности этапной модернизации или строительства, отсутствие необходимости локализации поголовья, реализация возможностей по увеличению срока хозяйственного использования высокопродуктивных коров. Дополнительное преимущество доильных роботов, которое еще предстоит реализовать большинству предприятий в отрасли – это повышение качества принимаемых решений на основе расширения полноты информации, собираемой и анализируемой по каждому животному, формирующей базы данных. В исследованиях ученых В. В. Кирсанова, Д. Ю. Павкина, С. С. Рузина, А. А. Цымбала [16] установлено, что при доении с помощью УДА-16А недопо-

лученная прибыль, по сравнению с роботом, за счёт повышения качества молока составляет 2,16 млн руб., затраты на лечение мастита – 63 тыс. руб., потери продукции у переболевших животных – 0,81 млн руб. Поэтому, как обоснованно отмечают исследователи В. И. Доровских, В. С. Жариков [17], предпочтение должно отдаваться дойным коровам, обладающим более высокой продуктивностью. Учитывать надо и то, что у нас отсутствуют отечественные роботизированные системы и, как следствие, высокие цены и затраты на их эксплуатацию. При этом, как замечают О. В. Бузина, Е. Г. Черемуха, А. В. Блинова [18], необходима селекция коров по молочной продуктивности при доении на роботизированной установке с более жесткой вынуждением коров, не отвечающих требованиям роботизированного доения.

Однако наши исследования показали, что выбраковка коров при доении на линейной установке выше в среднем на 10 %, чем при доении на роботах. Не исключено, что на пока-

зателях исследований сказалась направленная селекция животных в течение более 10 лет.

Выводы. 1. Результаты выполненных исследований показали, что при роботизированной системе доения созданы физиологически более комфортные условия для коров, поэтому, что необычайно важно, по трем генотипам животных выбыло в среднем на 10 % меньше, чем при доении на линейной установке (17 %), превосходство по сумме молочного жира и белка при доении на роботах составило 15,6 кг (574,7 против 559,6 кг).

2. Для совершенствования симментальской породы и использования коров при доении на роботах по молочной продуктивности (+31,3 и +55,6 кг молочного жира и белка), индексу осеменения (-0,17; - 0,04), упитанности (+0,68 и +0,18 балла), реакции на раздражитель (-23 и -7 %) и выбытию первотелок по 1 лактации (-3 и -3 %) приоритетным является генотип коров 50%МБ25%СИМ25%ГШ в сравнении с животными генотипов 25%СИМ75%ГШ и 50%СИМ50%ГШ.

Список литературы

1. Эрнст Л. К., Зиновьева Н. А., Гладырь Е. А. Комплексный порок позвоночника у голштинов. Животноводство России. 2007;(12):51–53.
2. Hazel A. R., Heins B. J., Hansen L. B. Fertility, survival, and conformation of Montbéliarde × Holstein and Viking Red × Holstein crossbred cows compared with pure Holstein cows during first lactation in 8 commercial dairy herds. Journal of Dairy Science. 2017;100(11):9447–9458. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12824>
3. Henderson L., Miglior F., Sewalem A., Wormuth J., Kelton D., Robinson A., Leslie K. E. Genetic parameters for measures of calf health in a population of Holstein calves in New York State. Journal of Dairy Science. 2011;94(12):6181–6187. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4347>
4. Левина Г. Н., Назаренко А. И. Компоненты молока коров симментальской породы разных генотипов. Молочное и мясное скотоводство. 2020;(8):14–18. DOI: <https://doi.org/10.33943/MMS.2020.75.12.004> EDN: HTZEZD
5. Piasentier E., Valusso R., Volpelli L. A., Sepulcri A., Pittia P., Failla S. Meat quality of Italian Simmental young bulls as affected by the genes frequency of Montbéliarde origin. Italian Journal of Animal Science. 2003;2(S1):328–330. DOI: <https://doi.org/10.4081/ijas.2003.s1.328>
6. Salfer J. A., Minegishi K., Lazarus W., Berning E., Endres M. I. Finances and returns for robotic dairies. Journal of Dairy Science. 2017;100(9):7739–7749. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11976>
7. King M. T. M., LeBlanc S. J., De Vries T. J. Cow-level associations of lameness, behavior, and milk yield of cows milked in automated systems. Journal of Dairy Science. 2017;100(6):4818–4828. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12281>
8. Шарипов Д. Р., Якимов О. А., Галимуллин И. Ш. Особенности использования роботизированной системы доения в молочном скотоводстве. Техника и технологии в животноводстве. 2021;3(43):17–21. DOI: <https://doi.org/10.51794/27132064-2021-3-17> EDN: OWVVOQ
9. Csiszter L. T., Gavojdian D., Neamt R., Neciu F., Kusza S., Ilie D. E. Effects of temperament on production and reproductive performances in Simmental dual-purpose cows. Journal of Veterinary Behavior. 2016;15:50–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2016.08.070>
10. Aerts J., Kolenda M., Piwczyński D., Sitkowska B., Önder H. Forecasting milking efficiency of dairy cows milked in an automatic milking system using the decision tree technique. Animals. 2022;12(8):1040. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani12081040>
11. Tse C., Barkema H. W., De Vries T. J., Rushen J., Pajor E. A. Impact of automatic milking systems on dairy cattle producers' reports of milking labour management, milk production and milk quality. Animal. 2018;12(12):2649–2656. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1751731118000654>

12. Grandin T. Transferring results of behavioral research to industry to improve animal welfare on the farm, ranch and the slaughter plant. *Applied Animal Behaviour Science*. 2003;81(3):215–228.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1591\(02\)00282-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1591(02)00282-4)
13. Донник И. М., Лоретц О. Г., Чеченихина О. С., Быкова О. А., Степанов А. В. Оценка типа стрессоустойчивости коров-матерей и их потомков. *Аграрный вестник Урала*. 2020;(10(201)):43–48.
DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2020-201-10-43-49> EDN: IGVETK
14. Виноградова Н. Д., Падерина Р. В. Эффективность применения автоматических доильных систем (AMS). *Нормативно-правовое регулирование в ветеринарии*. 2022;(3):53–56.
DOI: <https://doi.org/10.52419/issn2782-6252.2022.3.53> EDN: KKEJMG
15. Суровцев В. Н., Никулина Ю. Н. Эффективность освоения систем роботизированного доения. *Молочное и мясное скотоводство*. 2018;(8):3–7. DOI: <https://doi.org/10.25632/MMS.2018.14.44.001> EDN: YRNGGL
16. Кирсанов В. В., Павкин Д. Ю., Рузин С. С., Цымбал А. А. Сравнительная технико-экономическая оценка автоматизированных и роботизированных доильных установок. *Агроинженерия*. 2020;3(97):39–43.
DOI: <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-3-39-43> EDN: CNNRSH
17. Доровских В. И., Жариков В. С. Исследование влияния кратности доения коров роботами на их продуктивность. *Наука в центральной России*. 2019;(5(41)):69–77.
DOI: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2019-5-69-77> EDN: NNXXLT
18. Бузина О. В., Черемуха Е. Г., Блинова А. В. Использование возможностей роботизированной доильной установки для оптимизации отбора коров. *Техника и технологии в животноводстве*. 2024;14(2):14–15.
DOI: <https://doi.org/10.22314/27132064-2024-2-11> EDN: WXABJI

References

1. Ernst L. K., Zinov'eva N. A., Gladyr' E. A. Complex spine defect in Holsteins. *Zhivotnovodstvo Rossii*. 2007;(12):51–53. (In Russ.).
2. Hazel A. R., Heins B. J., Hansen L. B. Fertility, survival, and conformation of Montbéliarde × Holstein and Viking Red × Holstein crossbred cows compared with pure Holstein cows during first lactation in 8 commercial dairy herds. *Journal of Dairy Science*. 2017;100(11):9447–9458. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12824>
3. Henderson L., Miglior F., Sewalem A., Wormuth J., Kelton D., Robinson A., Leslie K. E. Genetic parameters for measures of calf health in a population of Holstein calves in New York State. *Journal of Dairy Science*. 2011;94(12):6181–6187. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4347>
4. Levina G. N., Nazarenko A. I. Components of milk of simmental breed belonging to various genotypes. *Molochnoe i myasnoe skotovodstvo = Journal of Dairy and Beef Cattle Farming*. 2020;(8):14–18. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.33943/MMS.2020.75.12.004>
5. Piasentier E., Valusso R., Volpelli L. A., Sepulcri A., Pittia P., Failla S. Meat quality of Italian Simmental young bulls as affected by the genes frequency of Montbéliarde origin. *Italian Journal of Animal Science*. 2003;2(S1):328–330. DOI: <https://doi.org/10.4081/ijas.2003.s1.328>
6. Salfer J. A., Minegishi K., Lazarus W., Berning E., Endres M. I. Finances and returns for robotic dairies. *Journal of Dairy Science*. 2017;100(9):7739–7749. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11976>
7. King M. T. M., LeBlanc S. J., De Vries T. J. Cow-level associations of lameness, behavior, and milk yield of cows milked in automated systems. *Journal of Dairy Science*. 2017;100(6):4818–4828.
DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12281>
8. Sharipov D. R., Yakimov O. A., Galimullin I. Sh. Features of robotic milking system at dairy cattle breeding using. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve = Machinery and technologies in livestock*. 2021;3(43):17–21. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51794/27132064-2021-3-17>
9. Csiszter L. T., Gavojdian D., Neamt R., Neciu F., Kusza S., Ilie D. E. Effects of temperament on production and reproductive performances in Simmental dual-purpose cows. *Journal of Veterinary Behavior*. 2016;15:50–55.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2016.08.070>
10. Aerts J., Kolenda M., Piwczyński D., Sitkowska B., Önder H. Forecasting milking efficiency of dairy cows milked in an automatic milking system using the decision tree technique. *Animals*. 2022;12(8):1040.
DOI: <https://doi.org/10.3390/ani12081040>
11. Tse C., Barkema H. W., De Vries T. J., Rushen J., Pajor E. A. Impact of automatic milking systems on dairy cattle producers' reports of milking labour management, milk production and milk quality. *Animal*. 2018;12(12):2649–2656. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1751731118000654>
12. Grandin T. Transferring results of behavioral research to industry to improve animal welfare on the farm, ranch and the slaughter plant. *Applied Animal Behaviour Science*. 2003;81(3):215–228.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1591\(02\)00282-4](https://doi.org/10.1016/S0168-1591(02)00282-4)
13. Donnik I. M., Loretts O. G., Chechenikhina O. S., Bykova O. A., Stepanov A. V. Assessment of the type of stress tolerance mother cows and their descendants. *Agrarnyy vestnik Urala = Agrarian Bulletin of the Urals*. 2020;(10(201)):43–48. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2020-201-10-43-49>

14. Vinogradova N. D., Paderina R. V. Efficiency of application of automatic milking systems (AMS). *Normativno-pravovoe regulirovanie v veterinarii* = Legal regulation in veterinary medicine. 2022;(3):53-56. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.52419/issn2782-6252.2022.3.53>
15. Surovtsev V. N., Nikulina Yu. N. Efficiency of voluntary milking systems implementation. *Molochnoe i myasnoe skotovodstvo* = Journal of Dairy and Beef Cattle Farming. 2018;(8):3-7. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25632/MMS.2018.14.44.001>
16. Kirsanov V. V., Pavkin D. Yu., Ruzin S. S., Tsymbal A. A. Comparative technical and economic assessment of automated and robotized milking plants. *Agroinzheneriya* = Agricultural Engineering (Moscow). 2020;3(97):39-43. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-3-39-43>
17. Dorovskikh V. I., Zharikov V. S. Study of the influence of multiplicity of cows of cows robots on their productivity. *Nauka v tsentral'noy Rossii* = Science in Central Russia. 2019;(5(41)):69-77. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2019-5-69-77>
18. Buzina O. V., Cheremukha E. G., Blinova A. V. Using the robotic milking machine for cow's selection optimizing capabilities. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve* = Machinery and technologies in livestock. 2024;14(2):14-15. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/27132064-2024-2-11>

Сведения об авторах

✉ **Левина Галина Николаевна**, доктор с.-х. наук, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста», пос. Дубровицы, д. 60, г.о. Подольск, Московская область, Российская Федерация, 142132, e-mail: info@vij.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7978-6696>, e-mail: gnlevina@yandex.ru

Назаренко Александр Иванович, кандидат биол. наук, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л. К. Эрнста», пос. Дубровицы, д. 60, г.о. Подольск, Московская область, Российская Федерация, 142132, e-mail: info@vij.ru

Information about the author

✉ **Galina N. Levina**, DSc in Agricultural Science, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L. K. Ernst, Dubrovitsy village, 60, Podolsk City District, Moscow Region, Russian Federation, 142132, e-mail: info@vij.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7978-6696>, e-mail: gnlevina@yandex.ru

Alexander I. Nazarenko, PhD in Biological Science, Federal Research Center for Animal Husbandry named after Academy Member L. K. Ernst, Dubrovitsy village, 60, Podolsk City District, Moscow Region, Russian Federation, 142132, e-mail: info@vij.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.896-905>

УДК 578.823.1:57.085.23

Культуральные свойства и генетическая характеристика штамма Gil-Gil вируса блютанга

© 2025. О. Г. Лаптева ✉, А. В. Луницин, А. А. Чадаева, О. С. Поволяева, А. Ю. Кольцов, С. Г. Юрков

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», пос. Вольгинский, Владимирская область, Российская Федерация

Распространение блютанга в странах северо-западной части Европы в 2023–2024 годах, вызванного высоко-вирулентным вирусом, относящимся к 3-му серотипу, актуализировало изучение биологических свойств штамма Gil-Gil вируса блютанга, депонированного более 50 лет назад в коллекции патогенов Федерального исследовательского центра вирусологии и микробиологии. Цель исследований – поиск наиболее перmissive клеточных систем для репродукции штамма Gil-Gil вируса блютанга 3-го серотипа, генетическая характеристика штамма и его серотипирование. Установлено, что вирус вызывает цитопатическое действие в клетках трёх сублиний перевиваемых культур ВНК-21/13, в перевиваемых линиях клеток ПСГК-60 и ПС. Перспективными клеточными системами для биотехнологии вакцинных препаратов определены монослойно-суспензионная культура клеток ВНК-21/13 и перевиваемая линия клеток ПСГК-60. В этих субстратах штамм Gil-Gil вируса блютанга накапливался до 7,25–7,50 lg ТЦД₅₀/см³. В реакции нейтрализации с референс-сывороткой подтверждена принадлежность штамма Gil-Gil к вирусу блютанга 3-го серотипа, а по результатам молекулярно-генетических исследований штамм отнесён к группе вирусов блютанга 3-го серотипа западного топотипа. Полученные результаты исследований рассматриваются как основополагающие для создания в короткий промежуток времени вакцинного препарата из охарактеризованного штамма вируса блютанга в случае заноса данного заболевания на территорию РФ.

Ключевые слова: культура клеток, культивирование, секвенирование, инфекционная активность, цитопатическое действие

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии» (тема № FGNM-2024-0003).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Лаптева О. Г., Луницин А. В., Чадаева А. А., Поволяева О. С., Кольцов А. Ю., Юрков С. Г. Культуральные свойства и генетическая характеристика штамма Gil-Gil вируса блютанга. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(4):896–905. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.896-905>

Поступила: 23.12.2024

Принята к публикации: 07.07.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

Cultural properties and genetic characteristics of the Gil-Gil strain of the bluetongue virus

© 2025. Oksana G. Lapteva ✉, Andrey V. Lunitsin, Anna A. Chadaeva, Olga S. Povolyaeva, Andrey Y. Koltsov, Sergey G. Yurkov

Federal Research Center for Virology and Microbiology, Volginsky settlement, Vladimir region, Russian Federation

The spread of bluetongue in the countries of north-western part of Europe in 2023–2024, caused by a highly virulent virus of serotype 3, has updated the study of the biological properties of the Gil-Gil strain of the bluetongue virus, deposited more than 50 years ago in the pathogen collection of the Federal Research Center for Virology and Microbiology. The aim of the research was to find the most permissive cell systems for the reproduction of the Gil-Gil strain of bluetongue virus of serotype 3, to characterize the strain genetically and to serotype it. The virus was found to cause cytopathic effect (CPE) in cells of three sublines of VNK-21/13 (newborn Syrian hamster kidney) transplanted cultures, in PSGC-60 (Siberian ibex kidney) and PS (saiga kidney) transplanted cell lines. The monolayer suspension culture of VNK-21/13 cells and the PSGC-60 transplanted cell line were identified as promising cell systems for the biotechnology of vaccine preparations. In these substrates, the Gil-Gil strain of bluetongue virus accumulated up to 7.25–7.50 lg TCD₅₀/cm³. The neutralization test with reference serum confirmed that the Gil-Gil strain belonged to bluetongue virus of serotype 3, and according to the results of molecular genetic studies, the strain was included in the group of bluetongue viruses of serotype 3 of the western topotype. The obtained results are considered to be fundamental for the development of a vaccine preparation from the characterized strain of the bluetongue virus in a short period of time in case of introduction of this disease into the territory of the Russian Federation.

Keywords: cell culture, culturing, sequencing, infectious activity, cytopathic effect

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 Center for Virology and Microbiology (topic No. FGNM-2024-0003).

The authors thank the reviewers for their contribution to the expert assessment of this work.

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

For citation: Lapteva O. G., Lunitsin A. V., Chadaeva A. A., Povolyaeva O. S., Koltsov A. Y., Yurkov S. G. Cultural properties and genetic characteristics of the Gil-Gil strain of the bluetongue virus. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):896–905. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.896-905>

Received: 23.12.2024

Accepted for publication: 07.07.2025

Published online: 29.08.2025

Вирус блютанга (BTV), относящийся к роду *Orbivirus* семейства *Reoviridae*, вызывает распространённое по всему миру заболевание домашних и диких жвачных животных, передается в основном трансмиссивным путём [1]. По результатам молекулярно-генетических и серологических исследований в настоящее время выделяют 36 различных серотипов BTV [2].

В эндемичных по вирусу блютанга странах ежегодно отмечается циркуляция новых для региона изолятов, включая реассортанты, вызывающие заболевание с клиническими проявлениями различной тяжести – от бессимптомного носительства до высоких уровней летальности восприимчивых животных [3].

Вирусологическими и молекулярно-генетическими методами исследований ранее была установлена циркуляция вируса блютанга 3-го серотипа (BTV-3) в Тунисе в 2018–2020 гг. [4], позднее обнаружили этот же серотип в южной провинции Сардинии [5] и на западе Сицилии [6], а затем и совместная циркуляция этого же серотипа с серотипами 1 и 9 в северных районах Израиля [7].

Осенью 2023 года в Европе возникли вспышки заболевания, вызванные вирусом блютанга 3-го серотипа. Первоначально инфекция охватила большую часть Нидерландов [8, 9]. Заболевание характеризовалось яркой клини-

ческой картиной у овец [9, 10, 11]. При распространении нового высоковирулентного BTV-3 уровень смертности среди овец достигал 75 %. Далее вспышки этой инфекции стали регистрировать на территории других стран – Германии [12], Бельгии, Великобритании [9, 10, 13].

Геномная последовательность выделенного изолята, кодирующая экспрессию вирусного белка 2 (VP2) BTV-3/NET2023, имела наибольшую гомологию со штаммами из Европы, что указывает на западный топотип, а полногеномное секвенирование показало, что BTV-3/NET2023, вызвавший вспышку BTV-3 в Нидерландах, значительно отличался от известных штаммов BTV-3. Всемирная Ветеринарная Информационная Система WAHIS (World Animal Health Information System) сообщает о вспышках блютанга среди восприимчивых животных в Дании¹ [8], Франции² [8, 9, 10], Англии [9, 10], Швеции³, Норвегии⁴, Швейцарии⁵, Австрии⁶, Португалии⁷ [14], Греции⁸. Ветеринарное управление Люксембурга информирует о 98 новых очагах блютанга, где инфицировано почти 900 животных⁹. В сентябре 2024 года зарегистрирована вспышка блютанга в Чехии, где на протяжении 15 лет данную инфекцию не регистрировали¹⁰ [15].

¹EVENT 5804. WAHIS: World Animal Health Information System. [Электронный ресурс]. URL: <https://wahis.woah.org/#/in-event/5804/dashboard> (дата обращения: 11.12.2024).

²Fièvre catarrhale ovine (FCO): situation en France, mesures de gestion et stratégie vaccinale. WAHIS: World Animal Health Information System. [Электронный ресурс]. URL: <https://agriculture.gouv.fr/la-situation-de-la-fievre-catarrhale-ovine-fco-en-france> (дата обращения 11.12.2024).

³EVENT 5871. WAHIS: World Animal Health Information System. [Электронный ресурс]. URL: <https://wahis.woah.org/#/in-event/5871/dashboard> (дата обращения: 11.12.2024).

⁴EVENT 5856. WAHIS: World Animal Health Information System. [Электронный ресурс]. URL: <https://wahis.woah.org/#/in-event/5856/dashboard> (дата обращения: 11.12.2024).

⁵EVENT 5840. WAHIS: World Animal Health Information System. [Электронный ресурс]. URL: <https://wahis.woah.org/#/in-event/5840/dashboard> (дата обращения: 11.12.2024).

⁶EVENT 5869. WAHIS: World Animal Health Information System. [Электронный ресурс]. URL: <https://wahis.woah.org/#/in-event/5869/dashboard> (дата обращения: 11.12.2024).

⁷WAHIS: World Animal Health Information System. [Электронный ресурс]. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/67693d924e2d5e9c0bde9d0f/BTV_Europe_12.1.pdf (дата обращения: 11.12.2024).

⁸Там же.

⁹WAHIS: World Animal Health Information System: [Электронный ресурс]. URL: <https://today.rtl.lu/news/luxembourg/a/2232636.html> (дата обращения: 3.12.2024).

¹⁰Минсельхоз Чешской Республики подтвердил первый за 15 лет случай заражения блютангом. Ветеринария и жизнь: информационный портал и газета. [Электронный ресурс]. URL: <https://vetandlife.ru/epizootic-situation/minselhoz-cheshskoj-respubliki-podtverdil-pervyj-za-15-let-sluchaj-zarazheniya-bljutangom/> (дата обращения: 3.12.2024).

В связи с распространением вируса блютанга в 2023 и 2024 годах в Европе возникла необходимость в оценке биологических свойств штаммов, относящихся по паспортным данным к 3-му серотипу вируса блютанга, но депонированных в различные временные периоды (более 50 лет назад) в «Государственной коллекции микроорганизмов, вызывающих опасные, особо опасные, в т. ч. зооантропонозные и не встречающиеся на территории страны болезни животных» (реестровый номер ЦКП – 441429, <http://ckp-rf.ru/ckp/441429/>).

Цель исследований – поиск перmissive клеточных систем к штамму Gil-Gil вируса блютанга, которые в дальнейшем могли бы быть применены для разработки технологии изготовления вакцины, а также молекулярно-генетическая характеристика штамма и его серотипирование.

Научная новизна – получены данные по биологическим свойствам штамма Gil-Gil вируса блютанга 3-го серотипа и определены наиболее перmissive перевиваемые линии клеток для его репродукции.

Материал и методы. *Культуры клеток:* перевиваемые линии клеток почки сайги (ПС), почки сибирского горного козерога (ПСГК-60), три сублинии перевиваемых клеток почки новорожденного сирийского хомячка (ВНК-21/13), перевиваемые клетки почки африканской зеленой мартышки (Vero) получали из коллекции клеточных культур ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии» (ФИЦВиМ)¹¹.

Вирусы: в экспериментах использовали вирус блютанга штамма Gil-Gil, выделенный от больных овец в Кении, поступивший в 1966 году из научной ветеринарной лаборатории в Конго (Браззавиль) и референс штамм BTV-3, предоставленный The Pirbright Institute (Великобритания) в 2009 году. Используемые штаммы вируса получали из «Государственной коллекции микроорганизмов, вызывающих опасные, особо опасные, в т. ч. зооантропонозные и не встречающиеся на территории страны болезни животных» (реестровый номер ЦКП – 441429, <http://ckp-rf.ru/ckp/441429/>).

Питательные среды и растворы: среда Игла-MEM на солевом растворе Эрла, DMEM (Dulbecco's Modified Eagle's Medium), фетальная сыворотка крови крупного рогатого скота (KPC) FBS (Fetal Blood Serum (БиолоТ, Россия),

0,25%-ный раствор трипсина, 0,02%-ный раствор версена, раствор антибиотика – гентамицин.

Оборудование и расходные материалы: холодильник низкотемпературный и CO₂-инкубатор фирмы Sanio (Япония); холодильник бытовой; микроскоп инвертированный OPTONID 03; бокс микробиологический «Ламинар-С»-1,2 фирмы LAMSYSTEMS; термостаты отечественные электрические; микропипетки 1- и 8-канальные с наконечниками объемом от 50 до 300 мкл («Ленпипет», Россия); флаконы пластиковые культуральные T25, T75, T175 и планшеты культуральные, 24- и 96-луночные (Corning Incorporated, США).

Восстановление и поддержание культур клеток. Восстановление культуры клеток ПС, Vero, ПСГК-60, ВНК-21/13 (три сублинии) после хранения в жидком азоте проводили по общепринятой методике. После размораживания ампул с культурами вносили 5-кратный объем питательной среды и отбирали пробы для подсчета концентрации клеток и определения их жизнеспособности по тесту витального окрашивания трипановым синим. Затем содержимое флаконов центрифугировали при 1000 об/мин в течение 15 мин. Раствор над осадком удаляли, а осадок ресуспендировали в ростовой среде (Игла-MEM с 10%-ной FBS) в таком объеме, чтобы концентрация клеток составила 150–200 тыс. кл/см³ для ПС, Vero, ПСГК-60, ВНК-21/13, затем суспензии вносили в культуральные флаконы. Через сутки инкубирования клеток проводили смену ростовой среды. Перевиваемые линии клеток ПС, Vero, ПСГК-60, ВНК-21/13 культивировали при температуре 37±0,5 °С.

Культуры пассировали методом последовательных пересевов, используя диспергирующие растворы с выбранным для каждой культуры соотношением компонентов.

Культивирование вируса. В культуральные флаконы полезной площадью 25 см² с конфлюэнтным монослоем клеток после удаления среды вносили вирусный материал в дозе 0,01–0,001 ТЦД₅₀/кл (50%-ная тканевая цитопатическая доза). Адсорбцию вируса проводили при температуре 37±0,5 °С в течение 1 часа. Затем во флаконы как с интактной, так и инфицированной культурой вносили поддерживающую среду DMEM с 2%-ной фетальной сывороткой КРС. Длительность культивирования зависела от характера поражения монослоя.

¹¹Юрков С. Г., Зуев В. В., Сидоров С. И., Кушнир С. Д., Смысллова Н. Ю., Неверовская Н. С. и др. Каталог коллекции клеточных культур ВНИИВВиМ. Покров: ВНИИВВиМ РАСХН, 2000. 78 с.
DOI: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21632428> EDN: SFJYIP

Определение инфекционной активности вирусного материала. Инфекционную активность вируса исследовали в клеточной культуре Vero, выращенной в 24-луночных планшетах. Посевная концентрация клеток составила 100 тыс. кл/см³. Готовили десятикратные разведения вирусосодержащей жидкости (ВСЖ) с 10⁻¹ по 10⁻⁷, и разведения 10⁻³ по 10⁻⁷ вносили по 1,0 см³ в лунки с культурой клеток. Для каждого разведения использовали по 4 лунки. Планшеты инкубировали при температуре 37±0,5 °С в атмосфере с повышенным содержанием (до 5 %) СО₂ и относительной влажности 95 %. Результаты титрования учитывали в течение 7 дней по развитию цитопатического эффекта. Титр вируса рассчитывали по методу Рида и Менча и выражали в ТЦД₅₀/см³.

Типирование вируса блютанга штамма Gil-Gil в реакции нейтрализации. Серотип штамма определяли в реакции нейтрализации по общепринятой методике. В лунки 96-луночной панели вносили среду Игла-МЕМ без сыворотки в объеме 100 мкл. Затем, в первые 4 ряда вносили референс сыворотку к вирусу блютанга 3-го серотипа в разведении 1:40, далее в 4 ряда – отрицательную сыворотку овец, не содержащую антитела к вирусу блютанга. Отдельно готовили разведение вируса блютанга штамма Gil-Gil, так чтобы в инокуляте содержалось по 100 инфекционных единиц, и вносили по 100 мкл в каждую лунку с сыворотками. Смесь сыворотки с вирусом инкубировали при температуре 4 °С в течение суток. Затем смесь переносили в 96-и луночную панель с однослойным монослоем клеток Vero. Параллельно вносили вирус в качестве контроля, который использовали для смеси с сывороткой и также проводили титрование этой дозы вируса. Учет результатов проводили на 2-3 сутки при проявлении цитопатического действия (ЦПД) вируса в клетках с отрицательной сывороткой крови.

Секвенирование вируса. Нуклеотидное секвенирование проводили с использованием специфических олигонуклеотидных праймеров [16]. Выделение специфических продуктов амплификации из агарозного геля осуществляли коммерческим набором для выделения нуклеиновых кислот DNA purificationkit (Thermo Fisher Scientific, США) с последующей реамплификацией фрагментов с помощью компонентов «Big Dye v.3.1. Terminator» (Applied Biosystems, США). Реакцию с 2'-, 3'-дидезок-

синуклеозидтрифосфатами проводили с прямым и обратным праймерами при следующих температурных режимах: 95 °С – 10 сек, 50 °С – 20 сек, 60 °С – 4 мин (25 циклов). Секвенирование проводили в автоматическом анализаторе Applied Biosystems Genetic Analyzer 3130 (Applied Biosystems, США).

Для просмотра и анализа последовательностей ДНК использовали компьютерные программы Sequencing Analysis и Sequence Scanner («Applied Biosystems», США).

Филогенетическое древо строили методом Maximum Likelihood, расчет эволюционных дистанций осуществляли по алгоритму Tamura-Nei, достоверность распределения последовательностей по группам проверяли путем бутстрэп-анализа со 1000-кратным повторением.

Результаты и их обсуждение. В соответствии с рекомендациями Всемирной организации охраны здоровья животных (ВОАН) по болезни блютанга [17] для репродукции вируса использовали культуры клеток ВНК-21/13 и Vero, а также дополнительно ПСГК-60 и ПС, отобранные на основании данных, полученных при разработке технологии изготовления поливалентной вакцины против блютанга [18].

Штамм Gil-Gil вируса блютанга по паспортным данным при выделении из патматериала культивировали в первичной культуре клеток почки ягнёнка (ПЯ), поэтому была проведена его адаптация к выращиванию в перевиваемых линиях клеток. В качестве контрольного штамма при культивировании и оценке вирусрепродуцирующих свойств клеток использовали референс-штамм BTV-3.

Характер и время проявления видимого поражения клеток вирусом были различны. В 2-х сублиниях клеток ВНК-21/13 (монослойной и монослойно-суспензионной) развитие ЦПД происходило за 2 суток культивирования (рис. 1 а, б, в).

Развитие ЦПД вируса выражалось в округлении клеток, их хаотичном скоплении по всему инфицированному монослою с последующим его разрежением вследствие дегенерации и отслоения клеток.

В сублинии клеток ВНК-21/13 («Всероссийский государственный научно-исследовательский институт контроля, стандартизации и сертификации ветеринарных препаратов» (ВГНКИ)) поражение монослоя было единичное и слабо выраженное (рис. 2).

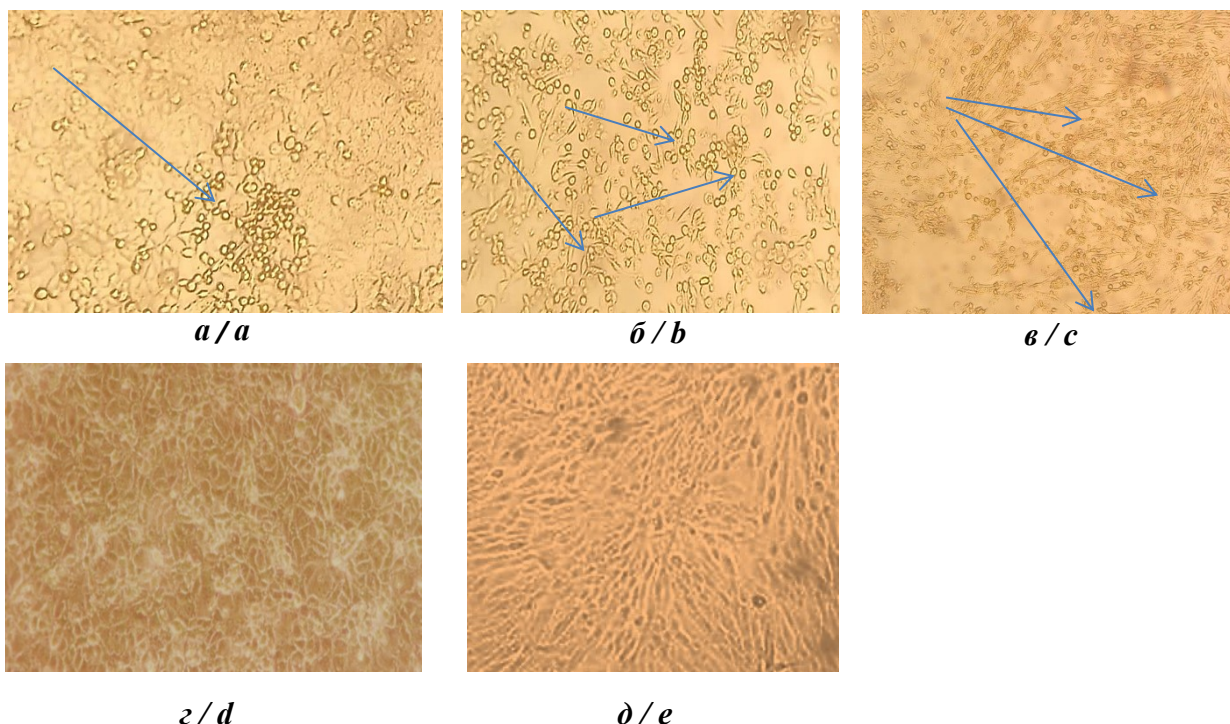


Рис. 1. Картина поражения культуры клеток: *а* и *б* – характер развития ЦПД вируса блютанга в монослойно-суспензионной культуре клеток ВНК-21/13 (1 и 2 сутки); *в* – развитие ЦПД вируса блютанга в монослойной культуре клеток ВНК-21/13; *г* – контрольная культура клеток ВНК-21/13 (монослойно-суспензионная); *д* – контрольная культура клеток ВНК-21/13 (монослойная) Ув.×100 /

Fig 1. Picture of cell culture damage: *a* and *b* – pattern of bluetongue virus CPE development in monolayer suspension culture of VNK-21/13 cells (1 and 2 days); *c* – development of bluetongue virus CPE in monolayer cell culture of VNK-21/13 cells; *d* – control cell culture VNK-21/13 (monolayer suspension), *e* – Control cell culture VNK-21/13 (monolayer). Magnification×100

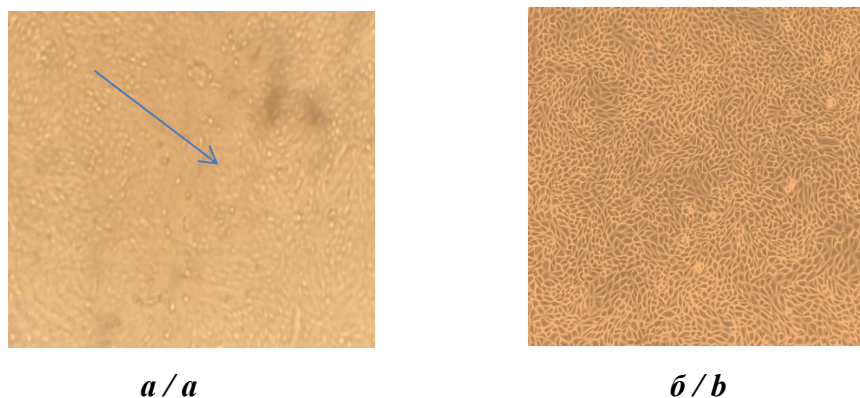


Рис. 2. Картина поражения культуры клеток: *а* – Единичное поражение клеток культуры ВНК-21/13(ВГНКИ) вирусом блютанга; *б* – Контрольная культура клеток ВНК-21/13 (ВГНКИ); Ув.×100 /

Fig. 2. Picture of cell culture damage: *a* – Single infection of culture VNK-21/13(VGNKI) cells by blue-tongue virus; *b* – Control cell culture VNK-21/13(VGNKI); Magnification×100

Различный характер проявления ЦПД вируса блютанга штамма Gil-Gil в трёх сублиниях культуры клеток ВНК-21/13 указывает на значительную гетерогенность их популяционного состава по клеткам-мишеням к данному вирусу, несмотря на то, что сублинии принадлежали к одному виду культуры клеток, в данном случае к ВНК-21/13. Сходные данные были

ранее получены при культивировании вируса бешенства в различных сублиниях клеток ВНК-21/13 [19].

В культуре клеток ПСГК-60 репродукция вируса в течение 2-х суток сопровождалась образованием тяжей из округлых клеток, разрывением клеточного пласта и деструкцией клеточного монослоя (рис. 3, *а*).

Идентичное поражение наблюдали и при инфицировании этой же культуры референс-штаммом вируса блютанга 3-го серотипа (рис. 3, б).

В культуре клеток ПС вирус блютанга штамма Gil-Gil на 4 сутки культивирования вызывал поражение монослоя, характеризовавшееся скоплением обособленных клеток, их округлением и разрушением клеточного пласта (рис. 4).

Основываясь на рекомендации ВОАН, для получения сопоставимых данных оценки вирусорепродуцирующих свойств различных клеточных культур определение инфекционной активности вирусных материалов проводили только в культуре клеток Vero (табл.). Характер поражения культуры клеток почки африканской зелёной мартышки вирусом блютанга двух штаммов был идентичен (рис. 5).

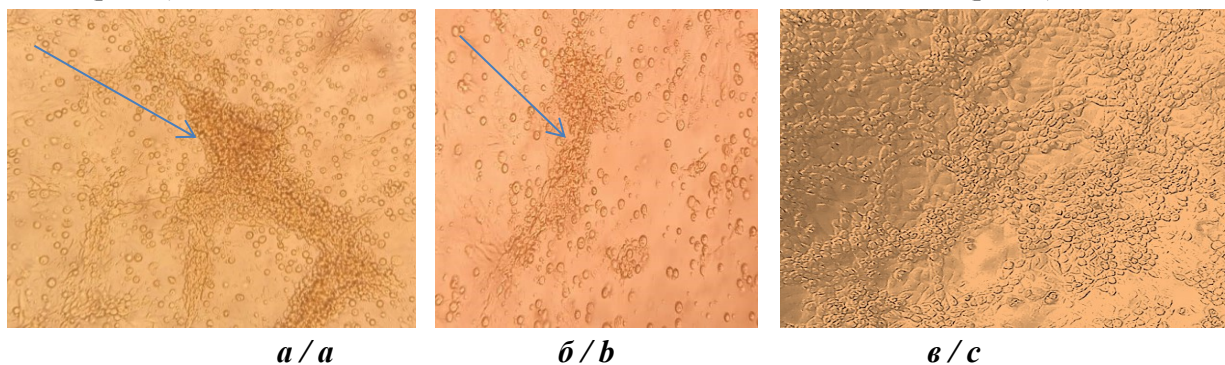


Рис. 3. Картина поражения культуры клеток: а – Характер развития ЦПД вируса блютанга в культуре клеток ПСГК-60, штамм Gil-Gil; б – референс-штамм BTV-3; в – Контрольная культура клеток ПСГК Ув.×100 /

Fig. 3. Picture of cell culture damage: a – Pattern of bluetongue virus CPE development in PSGC-60 cell culture, Gil-Gil strain; b – reference strain BTV-3; c – Control cell culture PSGC-60; Magnification×100

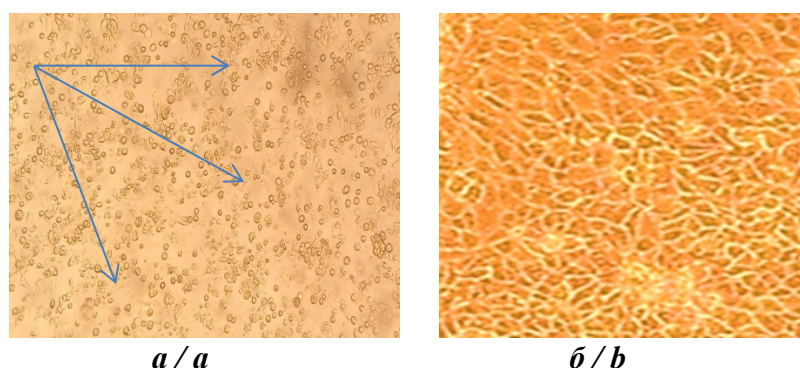


Рис. 4. Картина поражения культуры клеток: а – характер развития ЦПД вируса блютанга штамм Gil-Gil в культуре клеток почки сайги; б – контрольная культура клеток почки сайги Ув.×100 /

Fig. 4. Picture of cell culture damage: a – developmental pattern of CPE of bluetongue virus strain Gil-Gil in saiga kidney cell culture; b – control saiga kidney cell culture; Magnification×100

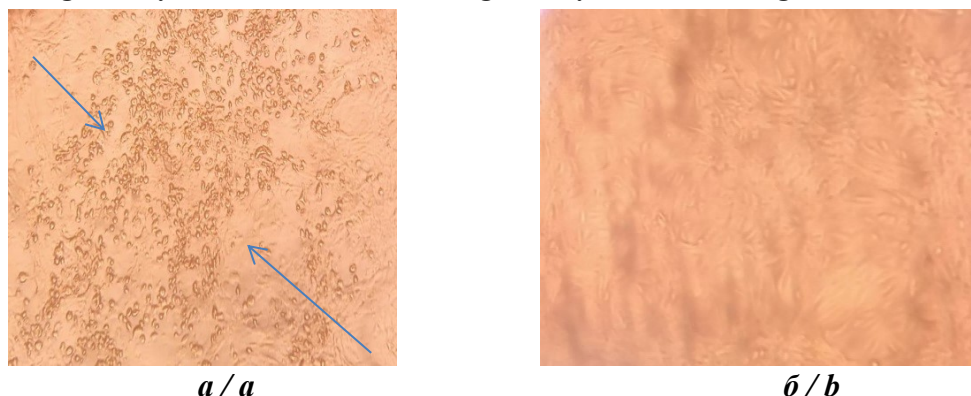


Рис. 5. Картина поражения культуры клеток: а – Характер развития ЦПД вируса блютанга 3 серотипа в культуре клеток Vero; б – Контрольная культура клеток Vero Ув.×100 /

Fig. 5. Picture of cell culture damage: a – The character of development of CPE of bluetongue virus serotype 3 in Vero cell culture; b – Control cell culture Vero; Magnification×100

Таблица – Инфекционная активность вируса блютанга штамма Gil-Gil и референс штамма BTV-3, полученного в различных перевиваемых линиях клеток (n = 5) /

Table – Infectious activity of bluetongue virus strain Gil-Gil and reference strain BTV-3 produced in different transplanted cell lines (n = 5)

Штамм вируса блютанга / Strain of bluetongue virus	Титр вируса ($\lg \text{ТЦД}_{50}/\text{см}^3$) в культуре клеток Vero, полученных в перевиваемых клетках / Virus titer ($\lg \text{TCDD}_{50}/\text{cm}^3$) in Vero cell culture obtained in transplanted cells			
	ВНК-21/13 (монослойно- суспензионная) / VНК-21/13 (monolayer suspension)	ВНК-21/13 (монослойная) / VНК-21/13 (monolayer)	ПСГК-60 / PSGC-60	ПС / PS (saiga kidney cell)
Gil-Gil	7,50±0,15	5,50±0,12	7,25±0,22	6,50±0,16
BTV-3	7,50±0,17	6,00±0,13	6,7±0,14	5,75±0,10

Примечания: перевиваемые линии клеток: ВНК-21/13 – почки новорожденного сирийского хомячка; ПСГК-60 – почки сибирского горного козерога; ПС – почки сайги; Vero – почки африканской зеленой мартышки /

Notes: transferable cell lines: transplanted kidney cell lines – VНК-21/13 of the newborn Syrian hamster, PSGK-60 – transplanted kidney cell lines of the Siberian ibex, PS – transplanted kidney cell lines of the saiga, Vero – transplanted kidney cells of the African green monkey

Представленные в таблице результаты показали, что наибольшей перmissивностью к исследуемым штаммам вируса обладали монослойно-суспензионная линия клеток ВНК-21/13 и культура клеток ПСГК-60. Ранее исследователями было показано, что данные культуры клеток перmissивны к вирусу блютанга 4, 9, 12, 16-го серотипов, где вирус накапливался от 5,75 до 6,50 $\lg \text{ТЦД}_{50}/\text{см}^3$ [20]. В нашей работе накопление штамма Gil-Gil вируса блютанга в монослойно-суспензионной линии ВНК-21/13 и культуре клеток ПСГК-60 было значительно выше – 7,25–7,50 $\lg \text{ТЦД}_{50}/\text{см}^3$.

Учитывая результаты вирусрепродуцирующей активности клеточных культур и их биотехнологические характеристики (способность росту в суспензии) для дальнейшей работы, как перспективные для крупномасштабного культивирования вируса блютанга штамма Gil-Gil, определены монослойно-суспензионные линии клеток ВНК-21/13 и ПСГК-60.

При типировании штамма Gil-Gil в реакции нейтрализации с использованием референс-сыворотки к 3-му серотипу вируса блютанга установлено, что данная референс-сыворотка нейтрализовала штамм Gil-Gil вируса блютанга в титре 1:40 при дозе вируса 100 $\text{ТЦД}_{50}/\text{кл}$. Таким образом, в реакции нейтрализации с референс-сывороткой подтверждена принадлежность штамма Gil-Gil вируса блютанга к 3-му серотипу.

Установлено, что аминокислотная последовательность белка VP2 коррелирует с резуль-

татами определения серотиповой принадлежности вируса блютанга [21]. Нуклеотидная последовательность 2-го сегмента генома вируса блютанга позволяет не только предопределить серотип вируса, но и определить другие его характеристики, например, топотип или нуклеотип.

С целью определения серотипа штамма Gil-Gil и подтверждения принадлежности BTV-3 к 3-му серотипу вируса блютанга было проведено секвенирование и филогенетический анализ последовательности 2-го сегмента генома вируса.

В результате сравнительного анализа с последовательностями 2-го сегмента штаммов/изолятов вируса блютанга, представленных в базе данных GenBank, было установлено, что штаммы Gil-Gil и BTV-3 относятся к 3-му серотипу и западному топотипу вируса блютанга (рис. 6).

Сравнительный анализ гомологии установленной последовательности штамма BTV-3 и опубликованных в базе данных GenBank продемонстрировали 100%-ную гомологию нуклеотидной последовательности штамма BTV-3 с последовательностью 2-го сегмента штамма RSArtrr/3 вируса блютанга 3-го серотипа (KP821039.1), гомология с последовательностями других серотипов не превышала 95 %.

Нуклеотидные последовательности штамма Gil-Gil имели 97,86 % степень гомологии с наиболее близкородственным штаммом RSArtrr/3, в то время как степень их гомологии с последовательностями других серотипов не превышала 95,0 %.

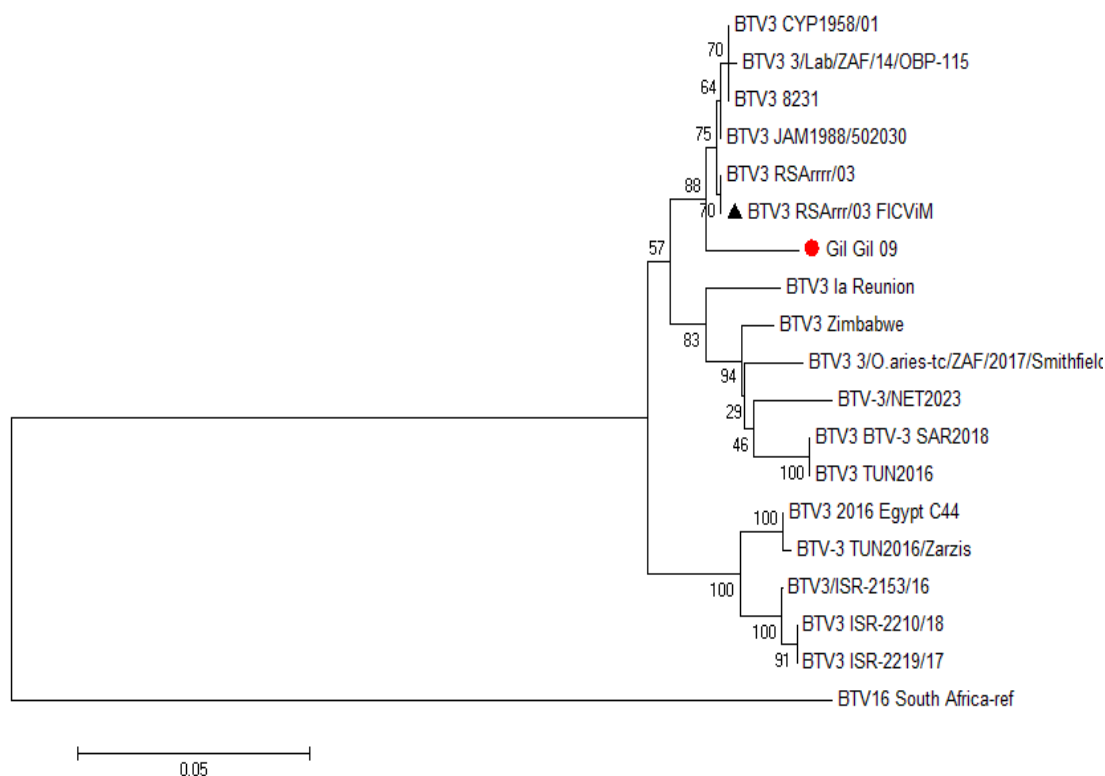


Рис. 6. Дендрограмма, построенная по методу Maximum Likelihood, показывающая связи между последовательностями 2 сегмента штаммов/изолятов ВБ, представленных в базе данных GenBank, и штаммами Gil-Gil, BTV3, полученными из ГК ФГБНУ ФИЦВиМ /

Fig. 6. Maximum Likelihood dendrogram showing the relationships between the sequences of segment 2 of BTV strains/isolates represented in the GenBank database and Gil-Gil, BTV3 strains obtained from the GC of FRCVM

Заключение. В результате проведенных исследований определены две наиболее перmissive клеточные линии ВНК-21/13 и ПСГК-60 для культивирования вируса блю-танга штамма Gil-Gil. Выбранные клеточные линии способны к культивированию не только стационарным, роллерным, но и суспензионным методами, т. е. они являются перспективными клеточными субстратами для крупномасштабного производства вируса при необхо-

димости изготовления вакцины. Использование для титрования единой клеточной линии Vero позволяет стандартизованно оценивать накопление вируса в различных клеточных культурах. С помощью «золотого стандарта» – реакции нейтрализации и методами молекулярно-генетических исследований подтверждено, что штамм Gil-Gil вируса блю-танга относится к 3-му серотипу.

References

1. Maclachlan N. J. Bluetongue: history, global epidemiology, and pathogenesis. Preventive Veterinary Medicine. 2011;102(2):107–111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2011.04.005>
2. Ries C., Vögtlin A., Hüsey D., Jandt T., Gobet H., Hilbe M. et al. Putative Novel Atypical BTV Serotype '36' Identified in Small Ruminants in Switzerland. Viruses. 2021;13(5):721. DOI: <https://doi.org/10.3390/v13050721>
3. MacLachlan N. J. The pathogenesis and immunology of bluetongue virus infection of ruminants. Comparative Immunology, Microbiology and Infectious Diseases. 1994;17(3-4):197–206. DOI: [https://doi.org/10.1016/0147-9571\(94\)90043-4](https://doi.org/10.1016/0147-9571(94)90043-4)
4. Lorusso A., Sghaier S., Di Domenico M., Barbria M. E., Zaccaria G., Megdich A. et al. Analysis of bluetongue serotype 3 spread in Tunisia and discovery of a novel strain related to the bluetongue virus isolated from a commercial sheep pox vaccine. Infection, Genetics and Evolution. 2018;59:63–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2018.01.025>
5. Cappai S., Rolesu S., Loi F., Liciardi M., Leone A., Marcacci M. et al. Western Bluetongue virus serotype 3 in Sardinia, diagnosis and characterization. Transboundary and Emerging Diseases. 2019;66:1426–1431. DOI: <https://doi.org/10.1111/tbed.13156>

6. Aguilar-Vega C., Fernández-Carrión E., Sánchez-Vizcaíno J. M. The possible route of introduction of bluetongue virus serotype 3 into Sicily by windborne transportation of infected *Culicoides* spp. *Transboundary and Emerging Diseases*. 2019;66:1665–1673. DOI: <https://doi.org/10.1111/tbed.13201>
7. Golender N., Klement E., Kovtunen A., Even-Tov B., Zamir L., Tiomkin E. et al. Comparative Molecular and Epidemiological Analyses of Israeli Bluetongue Viruses Serotype 1 and 9 Causing Outbreaks in 2018–2020. *Microorganisms*. 2023;11(2):366. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020366>
8. Holwerda M., Santman-Berends I., Harders F., Engelsma M., Vloet R., Dijkstra E. et al. Emergence of Bluetongue Virus Serotype 3, the Netherlands, September 2023. *Emerging Infectious Diseases*. 2024;30(8):1552–1561. DOI: <https://doi.org/10.3201/eid3008.231331>
9. Boender G.-J., Hagenaars T. J., Holwerda M., Spierenburg M. A. H., van Rijn P. A., van der Spek A. N., Elbers A. R. W. Spatial transmission characteristics of the bluetongue virus serotype 3 epidemic in the Netherlands, 2023. *Viruses*. 2024;16(4):625. DOI: <https://doi.org/10.3390/v16040625>
10. King S., Nicholls M., Scales J., Gubbins S., Pearce-Kelly P., Saverimuttu S. et al. The efficacy of vector-proof accommodation for the protection of livestock against *Culicoides* biting midges. *Parasites & Vectors*. 2025;18:108. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13071-025-06736-9>
11. Van den Brink K. M. J. A., Santman-Berends I. M. G. A., Harkema L., Scherpenzeel C. G. M., Dijkstra E., Bisschop P. I. H. et al. Bluetongue virus serotype 3 in ruminants in the Netherlands: Clinical signs, seroprevalence and pathological findings. *VetRecord*. 2024;195(4):e4533. DOI: <https://doi.org/10.1002/vetr.4533>
12. Voigt A., Kampen H., Heuser E., Zeiske S., Hoffmann B., Höper D. et al. Bluetongue Virus Serotype 3 and Schmallenberg Virus in *Culicoides* Biting Midges, Western Germany, 2023. *Emerging Infectious Diseases*. 2024;30(7):1438–1441. DOI: <https://doi.org/10.3201/eid3007.240275>
13. Voigt A., Kampen H., Heuser E., Zeiske S., Hoffmann B., Höper D. et al. Emergence of bluetongue virus serotype 3 in western Germany, October 2023, and *ad-hoc* monitoring in *Culicoides* biting midges. *BioRxiv*. 2024. 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1101/2024.02.26.582175>
14. Newbrook K., Obishakin E., Jones L. A., Waters R., Ashby M., Batten C., Sanders C. Clinical disease in British sheep infected with an emerging strain of bluetongue virus serotype 3. *VetRecord*. 2025;196(4):e4910. DOI: <https://doi.org/10.1002/vetr.4910>
15. Barros S. C., Henriques A. M., Ramos F., Luís T., Fagulha T., Magalhães A. et al. Emergence of Bluetongue Virus Serotype 3 in Portugal (2024). *Viruses*. 2024;16(2):1845. DOI: <https://doi.org/10.3390/v16121845>
16. Golender N., Bumbarov V., Eldar A., Lorusso A., Kenigswald G., Varsano J. S., Savini G. Bluetongue Serotype 3 in Israel 2013–2018: Clinical Manifestations of the Disease and Molecular Characterization of Israeli Strains. *Frontiers in Veterinary Science*. 2020;7:00112. DOI: <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00112>
17. WOAH Terrestrial Manual 2021. Chapter 3.1.3. – Bluetongue (infection with bluetongue virus). 2021. pp. 1–20. URL: https://www.woah.org/fileadmin/Home/fr/Health_standards/tahm/3.01.03_BLUETONGUE.pdf
18. Бальшева В. И., Нестеров Е. А., Луницин А. В., Живодеров С. П., Горшкова Т. Ф., Лаптева О. Г. и др. Эффективность трехвалентной инактивированной вакцины против блютанга для мелкого и крупного рогатого скота. Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2013;(4):49–51. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19124962> EDN: QCNHQP
19. Balysheva V. I., Nesterov E. A., Lunitsin A. V., Zhivoderov S. P., Gorshkova T. F., Lapteva O. G. et al. Efficacy of a trivalent inactivated vaccine against bluetongue cattle and small ruminants. *Doklady Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk* = Reports of the Russian Academy of agricultural sciences. 2013;(4):49–51. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19124962>
19. Лаптева О. Г., Филатова М. А., Нестеров Е. А. Репродукция вирусов блютанга и бешенства в различных сублиниях клеток ВНК-21/13. Актуальные проблемы инфекционной патологии ветеринарной медицины: мат-лы конф. молодых ученых. Покров: ВНИИ ветеринарной вирусологии и микробиологии, 2009. С. 200–206.
19. Lapteva O. G., Filatova M. A., Nesterov E. A. Reproduction de virus de Bluetongue et de rage dans diverses sous-lignées de cellules de VNK-21/13. Problèmes actuels de pathologie infectieuse de la Médecine vétérinaire: Jeunes scientifiques. Pskov: *VNIi veterinarnoy virusologii i mikrobiologii*, 2009. pp. 200–206.
20. Бальшева В. И., Сливко В. В., Жестерев В. И. Культивирование вируса блютанга в культурах клеток животных. Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2002;(6):46–48.
20. Balysheva V. I., Slivko V. V., Zhesterev V. I. Culture du virus de Bluetongue dans des cultures de cellules animales. *Doklady Rossiyskoy akademii sel'skokhozyaystvennykh nauk* = Reports of the Russian Academy of agricultural sciences. 2002;(6):46–48. (In Russ.).
21. Maan S., Maan N. S., Samuel A. R., Rao S., Attoui H., Mertens P. P. C. Analysis and phylogenetic comparisons of full-length VP2 genes of the 24 bluetongue virus serotypes. *Journal of General Virology*. 2007;88(2):621–630. DOI: <https://doi.org/10.1099/vir.0.82456-0>

Сведения об авторах

✉ **Лаптева Оксана Георгиевна**, кандидат вет. наук, старший научный сотрудник лаборатории лекарственных средств для животных, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Академика Бакулова, стр. 1, пос. Вольгинский, Петушинский р-он, Владимирская обл., Российская Федерация, 601125, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4435-8368>, e-mail: oksana-lapteva@rambler.ru

Луницын Андрей Владимирович, кандидат вет. наук, зам. директора по производству и качеству, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Академика Бакулова, стр. 1, пос. Вольгинский, Петушинский р-он, Владимирская обл., Российская Федерация, 601125, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5043-446X>

Чадаева Анна Александровна, кандидат биол. наук, младший научный сотрудник лаборатории молекулярной вирусологии, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Академика Бакулова, стр. 1, пос. Вольгинский, Петушинский р-он, Владимирская обл., Российская Федерация, 601125, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9615-9758>

Поволяева Ольга Сергеевна, кандидат биол. наук младший научный сотрудник лаборатории молекулярной вирусологии, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Академика Бакулова, стр. 1, пос. Вольгинский, Петушинский р-он, Владимирская обл., Российская Федерация, 601125, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5635-6677>

Кольцов Андрей Юрьевич, кандидат биол. наук ведущий научный сотрудник лаборатории геномики вирусов, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Академика Бакулова, стр. 1, пос. Вольгинский, Петушинский р-он, Владимирская обл., Российская Федерация, 601125, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3294-6602>

Юрков Сергей Григорьевич, доктор биол. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории молекулярной вирусологии, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Академика Бакулова, стр. 1, пос. Вольгинский, Петушинский р-он, Владимирская обл., Российская Федерация, 601125, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6801-9424>

Information about the authors

✉ **Oksana G. Lapteva**, PhD in Veterinary Science, senior researcher, the Laboratory of Drugs for Animals, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Akademik Bakulov str., building 1, Volginsky settlement, Vladimir region, Russian Federation 601125, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4435-8368>, e-mail: oksana-lapteva@rambler.ru

Andrey V. Lunitsin, PhD in Veterinary Science, Deputy Director for Production and Quality, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Akademik Bakulov str., building 1, Volginsky settlement, Vladimir region, Russian Federation 601125, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5043-446X>

Anna A. Chadaeva, PhD in Biological Science, junior researcher, the Laboratory of Molecular Virology, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Akademik Bakulov str., building 1, Volginsky settlement, Vladimir region, Russian Federation 601125, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9615-9758>

Olga S. Povolyaeva, PhD in Biological Science, junior researcher, the Laboratory of Molecular Virology, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Akademik Bakulov str., building 1, Volginsky settlement, Vladimir region, Russian Federation 601125, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5635-6677>

Andrey Yu. Koltsov, PhD in Biological Science, leading researcher, the Laboratory of Virus Genomics, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Akademik Bakulov str., building 1, Volginsky settlement, Vladimir region, Russian Federation 601125, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3294-6602>

Sergey G. Yurkov, DSc in Biological Science, professor, chief researcher, the Laboratory of Molecular Virology, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Akademik Bakulov str., building 1, Volginsky settlement, Vladimir region, Russian Federation 601125, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6801-9424>

✉ – Для контактов / Corresponding author

Однократная иммунизация аттенуированным штаммом «Волгоград/14с» вируса АЧС не защищает поросят от заражения гомологичным штаммом «Ставрополь 01/08»

© 2025. М. Е. Власов , Д. А. Кудряшов, И. П. Синдрякова, С. Ю. Моргунов, И. А. Титов

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии»,
пос. Вольгинский, Владимирская обл., Российская Федерация

После заноса вируса АЧС в 2007 году в Грузию болезнь распространилась по многим странам Европы и Азии. С момента заноса АЧС регистрировали в 42 странах Евразийского континента. Для искоренения болезни используют жесткие противозoonотические мероприятия, включающие в себя политику стемпинг аут, запрет на ввоз и вывоз всех видов животных, запрет на торговлю и другие мероприятия. С целью профилактики заболевания были разработаны и экспериментально проверены кандидатные инактивированные, живые ослабленные, субъединичные, векторные и ДНК-вакцины, испытания которых во многих случаях не увенчались успехом. Цель работы – изучить иммунобиологические и протективные свойства аттенуированного штамма вируса АЧС «Волгоград/14с» против заражения гомологичным вирулентным штаммом «Ставрополь 01/08» *in vivo*. Однократное внутримышечное введение аттенуированного штамма «Волгоград/14с» в дозе $10^{3.0}$ ГАЕ₅₀/см³ шести подсвинкам вызывало 1–4-дневную гипертермию (40,0–40,8 °С) без развития других клинических признаков. Виремию в крови инокулированных подсвинков выявляли с 3–7-го дня в титрах 2,0–3,0 lg ГАЕ₅₀/см³ с максимальным накоплением 3,75 lg ГАЕ₅₀/см³ на 10-й день, снижением на 14–21-й день до 1,75–2,75 lg ГАЕ₅₀/см³ и утрате инфекционности к 28-му дню. С 10-го дня в сыворотке крови привитых животных обнаруживали вирусоспецифические антитела к вирусу АЧС. Контрольное заражение гомологичным вирулентным штаммом «Ставрополь 01/08» вызывало развитие клинических признаков АЧС и рост виремии в крови до 6,0–7,5 lg ГАЕ₅₀/см³ у всех поросят опытной и контрольной групп. Болезнь протекала сверхостро, остро, подостро и хронически с гибелью всех контрольных и 5 из 6 подопытных подсвинков с характерными для АЧС клиническими признаками и патологоанатомическими изменениями.

Ключевые слова: иммунобиологические свойства, инокуляция, кандидатные вакцины, вирулентность, балльная оценка, виремия, антитела, протективность

Благодарность: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии» (тема № FGNM-2025-0002).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Власов М. Е., Кудряшов Д. А., Синдрякова И. П., Моргунов С. Ю., Титов И. А. Однократная иммунизация аттенуированным штаммом «Волгоград/14с» вируса АЧС не защищает поросят от заражения гомологичным штаммом «Ставрополь 01/08». *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2025;26(4):906–916.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.906-916>

Поступила: 06.03.2025

Принята к публикации: 15.08.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

Single immunization with the attenuated strain “Volgograd/14c” of the ASF virus does not protect piglets from infection with the homologous strain “Stavropol 01/08”

© 2025. Mikhail E. Vlasov , Dmitriy A. Kudryashov, Irina P. Sindryakova, Sergey Yu. Morgunov, Iliy A. Titov

Federal Research Center for Virology and Microbiology, Volginsky, Vladimir region,
Russian Federation “Volgograd/14c”

After the introduction of the ASF virus to Georgia in 2007, the disease spread to many countries in Europe and Asia. In present time, ASF has been registered in 42 countries of the Eurasian continent. Strict anti-epizootic measures are used to eradicate the disease, including stamping out policies, bans on import and export of all types of animals, trade bans, etc. In order to prevent the disease, different vaccine candidates have been developed, such as inactivated, live attenuated, subunit, vector and DNA vaccines. Unfortunately, in many cases, trials of these vaccine candidates have been unsuccessful. The aim of the work was to study the immunobiological and protective properties of the attenuated ASF virus strain “Volgograd/14c” against infection with the homologous virulent strain “Stavropol 01/08” *in vivo*. A single intramuscular inoculation of the attenuated strain “Volgograd/14c” at a dose of $10^{3.0}$ HAU₅₀/cm³ to six pigs caused 1–4 day hyperthermia (40.0–40.8 °C) without the development of other clinical signs. Viremia in the blood of inoculated pigs was detected from day 3–7 in titers of 2.0–3.0 lg HAU₅₀/cm³, with a maximum accumulation of 3.75 lg HAU₅₀/cm³ on day 10, a decrease on days 14–21 to 1.75–2.75 lg HAU₅₀/cm³ and loss of infectivity by day 28. Virus-specific antibodies to the ASF virus were detected in the serum of vaccinated animals from day 10. Challenge with the homologous virulent strain “Stavropol 01/08” caused the development of clinical signs and the

growth of viremia in the blood to 6.0–7.5 lg HAU_{50cm³} in all pigs of the experimental and control groups. The course of the disease was hyperacute, acute, subacute and chronic with the death of all control animals and 5 of 6 experimental pigs with clinical signs and pathological changes characteristic to ASF.

Keywords: immunobiological properties, inoculation, candidate vaccines, virulent, clinical score, viremia, antibodies, protectivity

Acknowledgment: the work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Research Center for Virology and Microbiology (theme No. FGNM-2025-0002).

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

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

For citation: Vlasov M. E., Kudryashov D. A., Sindryakova I. P., Morgunov S. Yu., Titov I. A. Single immunization with the attenuated strain "Volgograd/14c" of the ASF virus does not protect piglets from infection with the homologous strain "Stavropol 01/08". *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):906–916. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.906-916>

Received: 06.03.2025

Accepted for publication: 15.08.2025 Published online: 29.08.2025

Африканская чума свиней (АЧС) – контактиозная вирусная болезнь свиней, подлежащая регистрации. По причине отсутствия эффективных мер контроля, таких как вакцинопрофилактика, распространение заболевания приводит к серьезным экономическим потерям во всем мире [1]. Вспышки болезни среди домашних свиней в настоящее время контролируются с помощью строгих карантинных мероприятий, которые включают в себя полную депопуляцию и запреты на передвижение животных. Несмотря на все усилия по созданию вакцины, на сегодняшний день доступна только одна коммерческая вакцина, применяемая на территории Вьетнама¹ [2]. При разработке кандидатных вакцин учёными используются различные подходы, в результате чего были получены векторные, субъединичные, ДНК-вакцины, а также более традиционные – аттенуированные и инактивированные варианты. К сожалению, большинство из этих вакцинных кандидатов не формировали эффективный защитный иммунитет у свиней против АЧС [3]. Так, в работе Ж. М. Аргилагет с соавт. (J. M. Argilaguet et al., 2012) было показано, что свиньи, иммунизированные ДНК-конструкцией pCMV-UbsHAPQ, обладали частичной защитой от заражения вирусом АЧС [4]. В исследованиях Э. Каденас-Фернандес с соавт. (E. Cadenas-Fernández et al., 2021) продемонстрировано, что внутримышечная и внутрикожная инокуляция инактивированным вариантом вируса АЧС Pol16/DP/OUT21 не обеспечивала защиту свиней от последующего заражения живым вирулентным (не инактивированным) изолятом Pol16/DP/OUT21 [5]. Аналогичные результаты были показаны в работах других учёных, что подтверждает неэффективность инактивированных препаратов в отношении вируса АЧС [6, 7]. Наиболее перспек-

тивными кандидатами на вакцину могут быть живые аттенуированные варианты, их получают путем пассирования в чувствительных системах и методами генетических модификаций, которые способны обеспечивать защиту свиней от заражения гомологичными штаммами вируса АЧС до 100 %² [8, 9, 10]. Однако утратившие вирулентность варианты вследствие пассирования могут не обладать протективными свойствами или, наоборот, способствовать ускорению развития болезни и наступлению гибели свиней, а делеционные мутанты могут терять способность репродуцироваться *in vivo* [11, 12]. Также стоит отметить, что естественно или искусственно ослабленные (низковирулентные) штаммы вируса АЧС способны обеспечивать частичную гетерологичную защиту [13]. В работе М. Борка с соавт. (M. Borca et al., 2020) животные, инокулированные живым аттенуированным вирусом ASFV-G-Δ177L, были защищены от заражения и гибели при последующем заражении вирулентным родительским штаммом ASFV-G [14]. Эти данные указывают на тот факт, что иммунизация животных живым штаммом АЧС, прошедшим аттенуацию тем или иным образом, может обеспечивать высокий уровень протективного иммунитета против заражения гомологичным штаммом вируса.

Цель исследования – изучить иммунобиологические и протективные свойства штамма вируса АЧС «Волгоград/14с» против заражения гомологичным вирулентным штаммом «Ставрополь 01/08» *in vivo*. Исследуемый штамм «Волгоград/14с» потенциально может быть использован в качестве вакцинного кандидата или платформы для разработки рекомбинантного вируса с делецией тех или иных генов.

¹Global African Swine Fever Research Alliance (GARA) Gap Analysis Report. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <https://go.usa.gov/xPfWr> (дата обращения: 18.11.2024).

²Там же.

Научная новизна – изучены иммунобиологические свойства аттенуированного штамма вируса АЧС Волгоград/14с, прошедшего 14 перемежающихся пассажей в первичной культуре КМС (костный мозг свиней) и перевиваемой культуре клеток COS-1 (иммортизированные фибробласты почки африканской зелёной мартышки). Получены новые данные о развитии клинических признаков, кинетике вирусемии, серопревалентности, сероконверсии, протективных свойствах у поросят, инокулированных аттенуированным штаммом Волгоград/14с вируса АЧС в дозе $10^{3,0}$ ГАЕ₅₀ (50 % гемадсорбирующая единица).

Материал и методы. *Животные.* В работе использовали 9 голов клинически здоровых поросят породы крупная белая живой массой 20–25 кг, полученных из Сектора подготовки экспериментальных животных ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии» (ФИЦВИМ). Животных разделили на две группы: опытная (6 голов) и контрольная (интактная) группа (3 головы). Перед началом исследования был проведен 14-дневный период акклиматизации. Эксперименты на свиньях проводили в соответствии с рекомендациями ФГБНУ ФИЦВИМ и AVMA (American Veterinary Medical Association) по уходу и использованию лабораторных животных [15]. Оценку клинического состояния животных проводили по методике, предложенной К. Кинг с соавт. (K. King et al., 2011) [16].

Вирусы. Для иммунизации животных был использован аттенуированный штамм «Волгоград/14с» вируса АЧС. Инокуляцию свиней проводили на 0-й день внутримышечно в дозе $10^{3,0}$ ГАЕ₅₀/см³. Контрольное заражение осуществляли вирулентным штаммом «Ставрополь 01/08» вируса АЧС в той же дозе на 28-й день после инокуляции. Штаммы вируса АЧС «Волгоград/14с» и «Ставрополь 01/08» получены из Государственной коллекции микроорганизмов ФГБНУ ФИЦВИМ.

Отбор образцов. Образцы крови отбирали из краниальной полостей вены на 0, 3, 5, 7, 10, 14, 21, 28 дни после инокуляции штаммом «Волгоград/14с» вируса АЧС и на 3, 5, 7, 10, 14, 21, 28, 35 дни после контрольного заражения вирулентным штаммом вируса АЧС «Ставрополь 01/08». Для получения проб сыворотки крови использовали вакуумные пробирки с активатором свертывания крови, после обра-

зования сгустка, жидкую фракцию осторожно отбирали, минуя касания сгустка, затем центрифугировали в течение 10 мин при 2000xg, после надосадочную жидкость отбирали и аликвотировали.

Выявление генома вируса АЧС методом ПЦР в режиме реального времени. Выделение тотальной ДНК из исследуемых образцов проводили с помощью набора «ДНК-сорб Б» (Амплисенс, Россия) в соответствии с инструкцией производителя. Присутствие фрагментов генома вируса африканской чумы свиней в выделенных образцах тотальной ДНК было установлено методом ПЦР в режиме реального времени с использованием амплификатора CFX 96 touch (BioRad, США) согласно модифицированному протоколу, рекомендованному WOAH (World Organisation for Animal Health) [17]. Ст-пороговое число циклов, коэффициент Ст показывает сколько ПЦР-циклов необходимо, чтобы флуоресцентный сигнал превысил пороговый уровень шума. Чем меньше Ст, тем больше генетического материала с амплифицируемым фрагментом было в исходной пробе.

ИФА (иммуноферментный анализ). Вирусоспецифические антитела к белку р30 вируса АЧС в сыворотке крови выявляли иммуноферментным методом «АЧС-СЕРОТЕСТ плюс» (ООО «Ветбиохим», г. Москва).

Получение первичной культуры клеток лейкоцитов свиней (ЛС). Культуру клеток лейкоцитов свиней получали по принятой методике [18]. Культуру клеток ЛС инкубировали в 48-луночных пластиковых микропанелях в СО₂-инкубаторе при следующих условиях: концентрация СО₂ – 5 %; относительная влажность – 90 %; температура – 37,0±0,5 °С.

Определение инфекционной активности. Инфекционную активность вируса АЧС определяли титрованием в 3-суточной культуре клеток ЛС (на каждое разведение использовали по 4 лунки). Результаты оценивали по наличию специфической гемадсорбции в течение 5–7 суток. Титры вируса рассчитывали по методу, описанному Б. А. Кербером в модификации И. П. Ашмарина, и выражали в 50%-ных гемадсорбирующих единицах (ГАЕ₅₀/см³)³.

Статистический анализ и обработка данных. Статистическую обработку полученных результатов проводили с использованием программы Graph Pad Prism.

³Ашмарин И. П., Васильев Н. Н., Амбросов В. А. Быстрые методы статистической обработки и планирование экспериментов. Л.: изд-во Ленинградского университета, 1974. 76 с.

Результаты и их обсуждение. Атенуированный штамм «Волгоград/14с» был получен из вирулентного штамма Волгоград-2012, относящегося ко II генотипу и 8-му серотипу вируса АЧС. Пассирование вирулентного штамма Волгоград-2012 (1 пассаж в КМС) проводили в перевиваемой культуре клеток тестикул поросёнка (ПТП) в присутствии 2 % свиной сыворотки с инкубацией вируса при температуре $37\pm 0,5$ °C в течение 8–10 суток (4 пассажа), заражение проводили в дозе $5,0 \lg \text{ГAE}_{50}/\text{см}^3$. После проведения 4 последовательных пассажей регистрировали снижение инфекционной активности до $1,0\text{--}1,5 \lg \text{ГAE}_{50}/\text{см}^3$. Далее вирус пассировали в перевиваемой культуре клеток COS-1 в присутствии 1%-ной сыворотки крупного рогатого скота с инкубацией при температуре $37\pm 0,5$ °C в течение 6–8 суток. На уровне 10 пассажа вирус стал накапливаться в перевиваемой линии клеток COS-1 в титре $6,0\text{--}7,0 \lg \text{ГAE}_{50}/\text{см}^3$, а к 12–14 пассажиру его инфекционная активность составила $7,5 \lg \text{ГAE}_{50}/\text{см}^3$ [19].

Как было показано в предыдущем исследовании, у одного из двух привитых штаммом «Волгоград/14с» поросят после введения регистрировали незначительную гипертермию ($40,1\text{--}40,3$ °C) на 6–7 день, без развития других клинических признаков. После контрольного заражения гомологичным штаммом «Ставрополь 01/08» вируса АЧС у одного из животных наблюдали гипертермию ($40,3\text{--}41,2$ °C) на 10–12 день с последующими ее рецидивами на 22, 23 и 27 дни, других клинических признаков болезни не регистрировали, и поросенок оставался клинически здоровым до конца эксперимента (32 дня). После эвтаназии на 32 день на вскрытии видимых патологоанатомических изменений внутренних органов отмечено не было [12].

Животных опытной группы (6 голов) внутримышечно инокулировали аттенуированным штаммом «Волгоград/14с» в дозе $10^{3,0} \text{ГAE}_{50}/\text{см}^3$. После прививки у трех поросят регистрировали только гипертермию ($40,0\text{--}40,8$ °C) от 1 до 4 дней (рис. 1), других клинических признаков не наблюдали, клинический показатель для данной группы не превышал 4–5 баллов.

После контрольного заражения вирулентным штаммом «Ставрополь 01/08» животные опытной группы заболели на 3 сутки, заболевание характеризовалось гипертермией ($40,9\text{--}41,7$ °C), общим угнетением, отказом от корма, покраснением слизистой оболочки глаз. У заболевших поросят №1, 3, 4, 5 регистрировали тяжелую

форму болезни с характерными клиническими признаками АЧС – лихорадку ($41,6\text{--}42,0$ °C), полную потерю аппетита и активности, покраснение и цианоз отдельных участков кожи ушей, живота, промежности, хрипы при дыхании и истечения из носа, шаткость походки (атаксия), парезы конечностей. Длительность болезни составила 2–4 дня. Эти животные опытной группы пали на 5–7-ой день после контрольного заражения в сроки, характерные для сверхострой и острой форм болезни.

Животные контрольной группы (№ 7, 8, 9) пали на 6–8 день после заражения с признаками острой формы АЧС, выражающимися в гипертермии ($41,1\text{--}41,9$ °C), утрате активности и аппетита, цианотичности кончиков ушей и хвоста, парезами и параличами конечностей. Клинический показатель составил 14–19 баллов. На вскрытии поросят регистрировали ярко выраженную картину патологоанатомических изменений, характерных для АЧС. Наблюдались отежные и геморрагичные лимфатические узлы, похожие на сгустки крови (более выраженные желудочные и печеночные), кровоизлияния на сердце, увеличенная, рыхлая селезенка от бордового до черного цвета с закругленными краями. Кроме того, кровоизлияния наблюдали на капсуле почек, в мозговом и корковом слоях почек, застойные явления в печени, кровоизлияния в желчный пузырь. В легких наблюдали застойную гиперемия с петехиями, а также тяжелый альвеолярный и интерстициальный отек.

У подсвинка № 6 в течение 5 дней регистрировали гипертермию до $41,9$ °C, снижение активности и аппетита с последующим приходом в состояние физиологической нормы. На 12-й день после контрольного заражения у него наблюдали рецидивирующую лихорадку ($41,1\text{--}41,9$ °C) с последующим прогрессированием болезни, респираторным дистрессом, хромотой и отеком сустава, покраснением кончиков ушей и некротическими поражениями на коже. Клинический показатель варьировал от 4 до 21 балла (рис. 2). Данный подсвинok был подвергнут эвтаназии на 21-й день после контрольного заражения.

На вскрытии наблюдали характерные для хронической формы АЧС патологоанатомические изменения. Пневмония, фибринозный перикардит, отежность лимфатических узлов с серозно-геморрагичными поражениями (более выражены средостенные лимфатические узлы), фибринозный полисерозит.

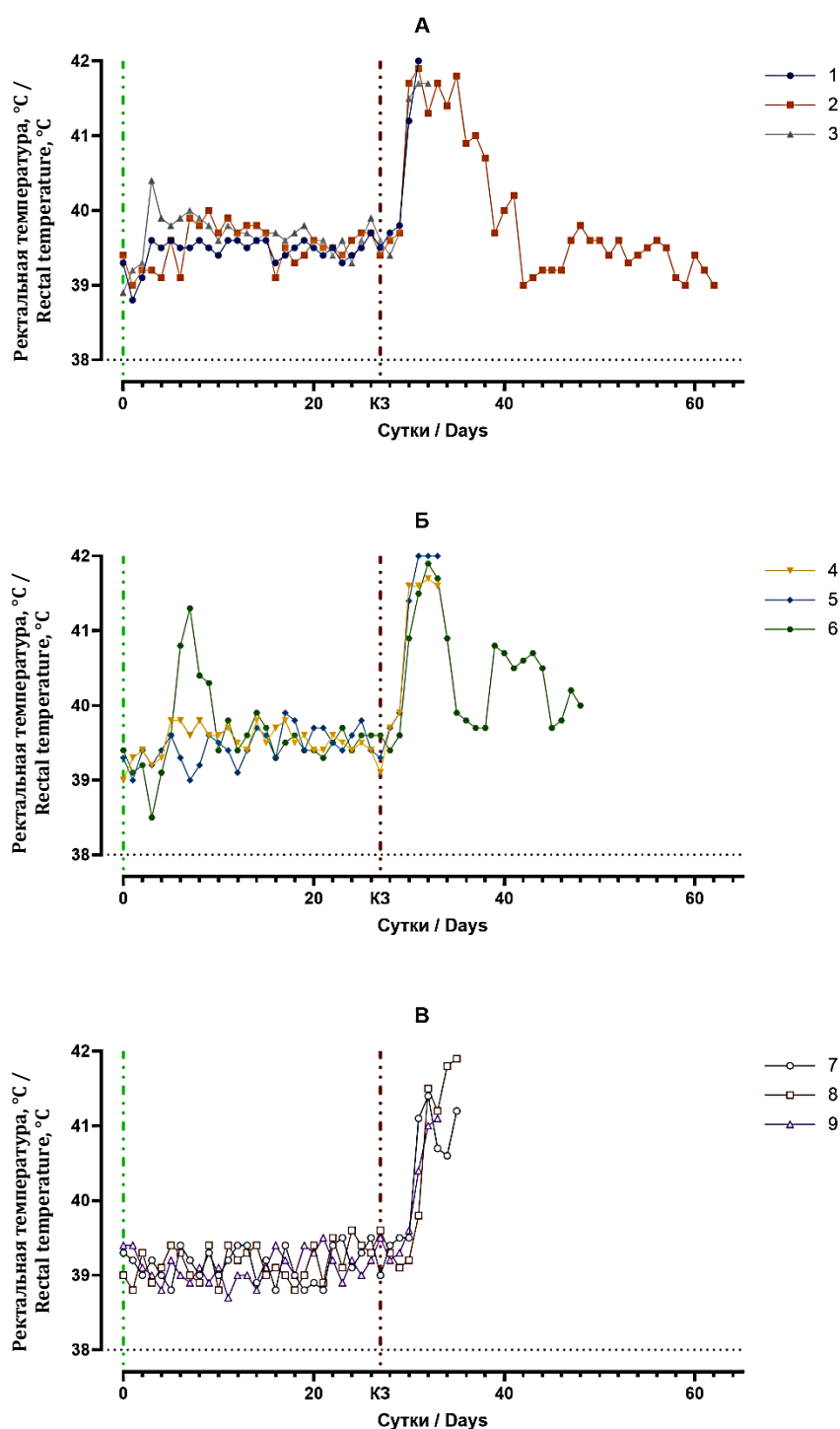


Рис. 1. Графики, отражающие изменения ректальной температуры у животных: А – опытная группа №№ 1, 2, 3; Б – опытная группа №№ 4, 5, 6; В – контрольная группа №№ 7, 8, 9. Вертикальной пунктирной линией отмечен период – 28 дней после иммунизации /

Fig. 1. Graphs showing changes of rectal temperature in animals: А – experimental group №№ 1, 2, 3; Б – experimental group №№ 4, 5, 6; В – control group №№ 7, 8, 9. Vertical dashed line marks the period of challenge – 28 days after immunization

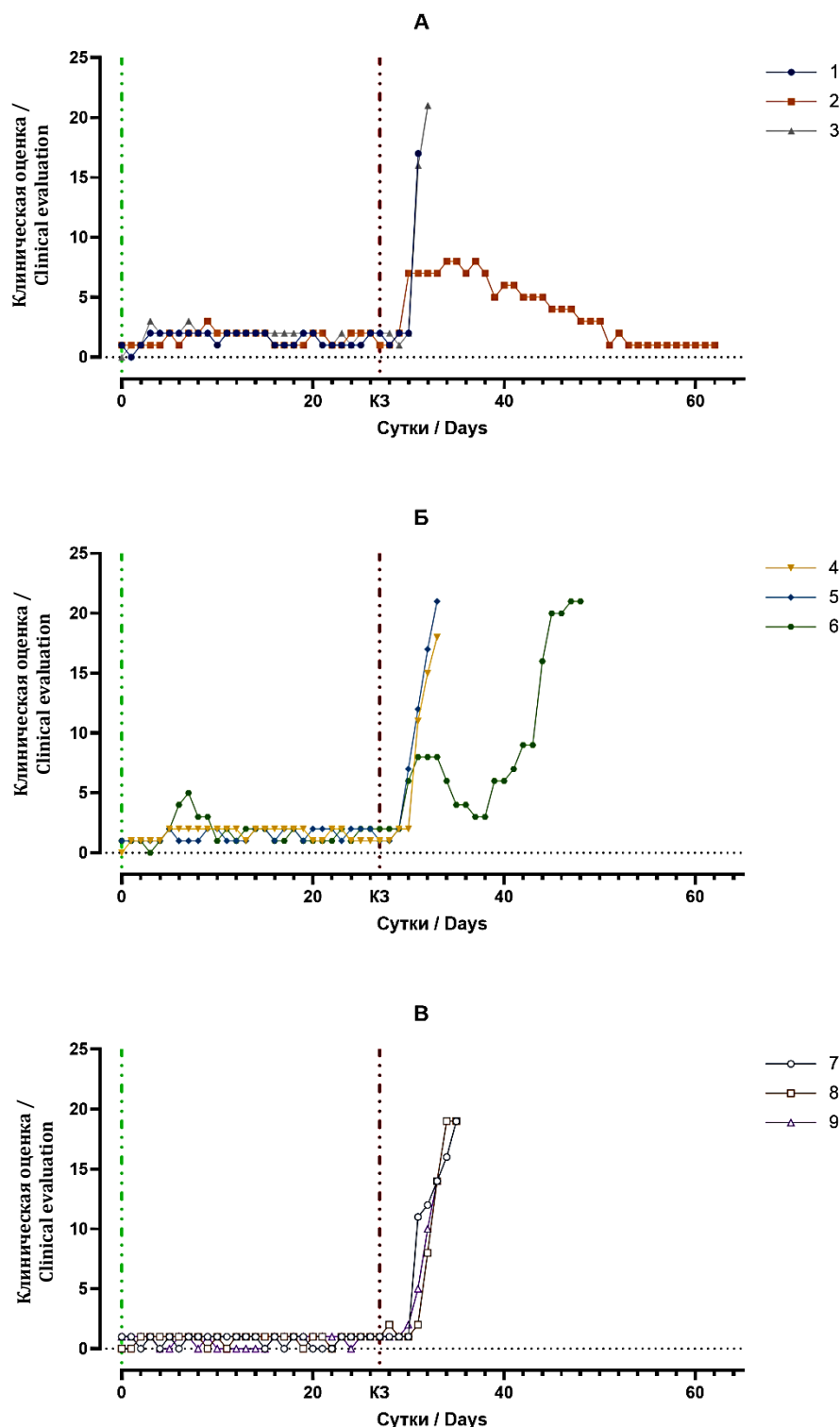


Рис. 2. Графики, отражающие изменения клинических признаков АЧС у животных: А – опытная группа №№ 1, 2, 3; Б – опытная группа №№ 4, 5, 6; В – контрольная группа №№ 7, 8, 9. Клиническая оценка признаков выражена в баллах и проведена по методике, описанной К. Кинг и соавт. (King, et al., 2011) [16]. Вертикальной пунктирной линией отмечен период – 28 дней после иммунизации /

Fig. 2. Graphs showing changes in clinical signs of ASF in animals: А – experimental group №№ 1, 2, 3; Б – experimental group №№ 4, 5, 6; В – control group №№ 7, 8, 9. Clinical evaluation of the signs was expressed in points according to the methodology described by King et al., 2011 [16]. Vertical dashed line marks the period of challenge – 28 days after immunization

Длительность болезни у подсвинка №2 составила 12 дней, сопровождалась лихорадкой (40,0–41,9 °C), частичным снижением аппетита и подвижности, легким респираторным дистрессом с последующим приходом в состояние физиологической нормы. Выраженность клинических признаков в пик их проявления достигала 7–8 баллов. На 35-й день после контрольного заражения его подвергли эвтаназии. На вскрытии регистрировали фибринозный перикардит, увеличение средостенных лимфатических узлов, единичные поражения в легких, частично гиперемизированную спленоmegалию.

Вирус АЧС в крови свиней, инокулированных поросят штаммом Волгоград/14с, начинали выявлять с 3–7 суток в титрах 2,0–3,0 lg ГАЕ₅₀/см³. Наибольшую инфекционную активность вируса в крови регистрировали на 10-й день после инокуляции, титр вируса в эти сроки достигал 3,75 lg ГАЕ₅₀/см³. На 14–21-й день отмечали снижение накопления вируса в крови до 1,75–2,75 lg ГАЕ₅₀/см³, а к 28-му дню инфекционный вирус в крови не выявили. После контрольного заражения у всех поросят, включая контрольных, титр вируса в крови составил: на 3-й день – 4,0–6,0, на 5-й день – 6,0–7,0, на 7-й – 6,0–7,5 lg ГАЕ₅₀/см³ (рис. 3). У животных №2 и №6 с 10–14 дня регистрировали снижение титра вируса в крови до 4,0–5,25 lg ГАЕ₅₀/см³. Так, у особи №6 на 21-й день вiremия в крови составила 3,5 lg ГАЕ₅₀/см³, у №2 – 2,0 lg ГАЕ₅₀/см³, а к 28-му дню у поросенка №2 вирус не выделили. В результате постановки ПЦР-РВ установлено, что фрагменты генома в пробах крови, полученных после инокуляции штаммом «Волгоград/14с» вируса АЧС поросят, начинали выявлять с 3–5 дня (Ct 30–37) и до контрольного заражения, с максимальной концентрацией ДНК на 10–14-й (Ct 25–28). Контрольное заражение вирулентным штаммом «Ставрополь 01/08» приводило к увеличению вирусной нагрузки (Ct 19–24) в крови всех животных и сохранялось до гибели или эвтаназии (21 и 35 дни – срок наблюдения) поросят.

В образцах сыворотки крови наличие вирусоспецифических антител к белку Р30 вируса АЧС начинали выявлять с 10-го дня и до контрольного заражения с максимальными значениями, выявленными на 21-й день.

Вирус африканской чумы свиней вызывает острую геморрагическую лихорадку, что приводит к высокой летальности, а отсутствие вакцины ограничивает контроль за тестированием и массовым убоем заболевших и контактировавших с ними свиней. Защита от заражения и гибели формируется у свиней,

перенесших вирусную инфекцию, вызванную различными по степени вирулентности вариантами АЧС, с устойчивостью к заражению гомологичным, реже – гетерологичным вирусом. В предыдущих исследованиях было показано, что аттенуированный штамм Катанга-350 вызывает 80 % защиты после заражения гомологичным штаммом Lisbon-57, а также даёт гетерологичную защиту против вирулентного штамма «Ставрополь 01/08» [20]. Определенный уровень протективности наблюдали и при заражении вирулентным штаммом «Ставрополь 01/08» свиней, ранее иммунизированных штаммом Катанга-350, степень защиты составила 40 % [21]. При изучении защитных свойств негемадсорбирующего штамма PSA-1 NH регистрировали гетерологичную защиту свиней от вирулентного штамма «Ставрополь 01/08», достигающую 80 % [22]. Ранее установлено, что негемадсорбирующие штаммы OURT88/3 и NH/P68 формировали защиту у свиней как против родственных штаммов, так и против штаммов другого генотипа [23, 24, 25]. Полученные путем делеции генов аттенуированные штаммы HLJ/18-7GD, ASFV-G-ΔI177L, ASFV-G-ΔMGF и ASFV ΔMGF360/505_Stav в лабораторных условиях способны формировать высокий уровень защиты от гомологичных вирулентных штаммов АЧС [2, 26, 27, 28]. В то же время делеция генов MGF360-10L/505-7R вируса африканской чумы свиней не обеспечивала защитой свиней при последующем заражении гомологичным штаммом [29].

Причины такого разнообразия в эффективности иммунизации различными аттенуированными штаммами и различная вероятность наличия гетерологичной защиты против штаммов других генотипов могут заключаться в обнаруженном у вируса АЧС антителозависимом усилении инфекции (ADE). Антителозависимое усиление инфекции – это явление, при котором протективные или непротективные антитела, взаимодействуя с вирусной частицей, способствуют её проникновению в клетку, тем самым усиливая инфекционный процесс [25]. Феномен ADE достаточно хорошо изучен для ряда опасных вирусных заболеваний, таких как лихорадка Денге, COVID-19, СПИД, а также болезней, вызываемых вирусами Эбола и Зика [30]. Предположения о влиянии ADE на инфекционный процесс при АЧС высказывались довольно давно, однако этому явлению не уделяется достаточного внимания, в то время как результаты, полученные в ходе попыток разработки аттенуированных или субъединичных вакцин против АЧС, могут свидетельствовать

о значительном влиянии ADE на результаты иммунизации [31]. В работе С. Ян с соавт. (X. Yang et al., 2024) указано, что антитела к белку A137R вируса АЧС вызывают эффект

ADE в эксперименте *in vitro* [32]. Информация по другим белкам АЧС, которые могут принимать участие в возникновении ADE, в научной литературе отсутствует.

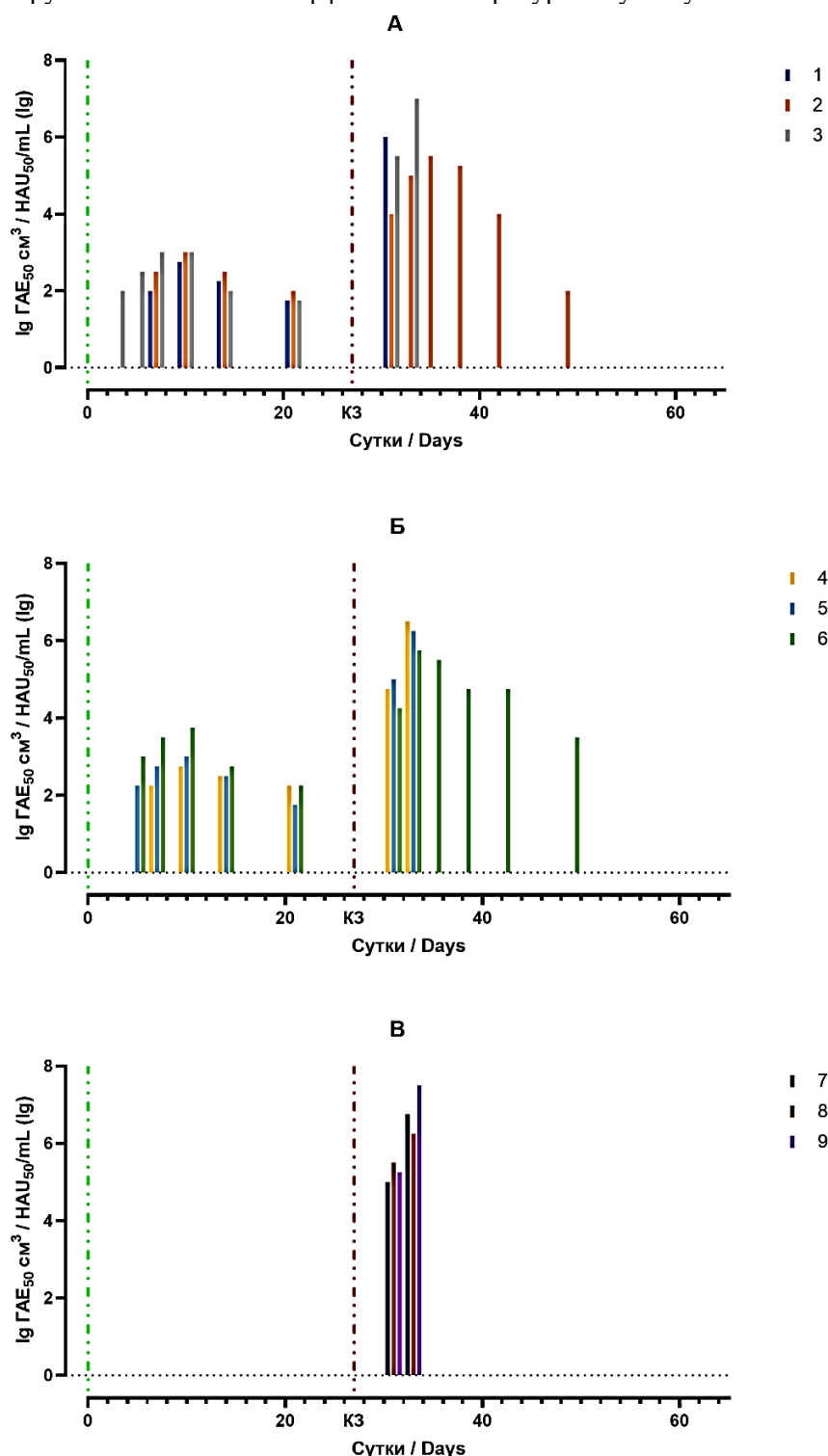


Рис. 3. Диаграмма виремии (lg ГAE₅₀/см³) в крови поросят: А – опытная группа №№ 1, 2, 3; Б – опытная группа №№ 4, 5, 6; В – контрольная группа №№ 7, 8, 9. Вертикальной пунктирной линией отмечен период – 28 дней после иммунизации /

Fig. 3. Viremia diagram (lg HAE₅₀/cm³) in the blood of pigs: А – experimental group №№ 1, 2, 3; Б – experimental group №№ 4, 5, 6; В – control group №№ 7, 8, 9. Vertical dashed line marks the period of challenge – 28 days after immunization

Другим немаловажным фактором, способным оказать влияние на иммунный ответ при АЧС, является общее состояние организма перед иммунизацией, в частности, состав крови, возраст и порода животного.

В предыдущем эксперименте было продемонстрировано, что однократно иммунизированные свиньи были защищены от гибели и развития тяжелых клинических признаков АЧС [25]. Однако в настоящем эксперименте не удалось достичь тех же успехов и воспроизвести подобные результаты. Возможно, это связано с постановкой опыта на свиньях иной возрастной категории, а также использование до этого их в качестве доноров крови.

Заключение. Как показали результаты исследований, при однократном внутримышечном введении в дозе $10^{3,0}$ ГАЕ₅₀ штамм «Волгоград/14с» вируса АЧС вызывал у подсвинков

субклиническую и бессимптомную форму болезни, способствовал образованию специфических антител у всех привитых поросят, но формировал низкий процент защиты от гибели. После инокуляции у животных регистрировали виремию в крови с 3 по 21 день в титрах $1,75-3,75$ Ig ГАЕ₅₀/см³.

После контрольного заражения вирулентным штаммом «Ставрополь 01/08» все 6 поросят заболели, 5 из них пали с признаками сверхострой, острой и хронической форм АЧС с характерными для этих форм клиническими признаками и патологоанатомическими изменениями. У переболевшего поросенка, несмотря на отсутствие выраженных клинических признаков к концу эксперимента, при вскрытии были выявлены патоморфологические изменения, характерные для африканской чумы свиней.

References

1. Blome S., Franzke K., Beer M. African swine fever – A review of current knowledge. *Virus Research*. 2020;287:198099. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2020.198099>
2. Tran X. H., Le T. T. P., Nguyen Q. H., Do T. T., Nguyen V. D., Gay C. G., et al. African swine fever virus vaccine candidate ASFV-G-Δ1177L efficiently protects European and native pig breeds against circulating Vietnamese field strain. *Transboundary and Emerging Diseases*. 2022;69(4):e497–e504. DOI: <https://doi.org/10.1111/tbed.14329>
3. Chathuranga K., Lee J.-S. African swine fever virus (ASFV): Immunity and vaccine development. *Vaccines*. 2023;11(2):199. DOI: <https://doi.org/10.3390/vaccines11020199>
4. Argilaguet J. M., Perez-Martin E., Nofrarias M., Gallardo C., Accensi F., Lacasta A., et al. DNA vaccination partially protects against African swine fever virus lethal challenge in the absence of antibodies. *PLoS One*. 2012;7(9):e40942. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040942>
5. Cadenas-Fernández E., Sánchez-Vizcaíno J. M., Born E., Kosowska A., Kilsdonk E., Fernández-Pacheco P. et al. High Doses of Inactivated African Swine Fever Virus Are Safe, but Do Not Confer Protection against a Virulent Challenge. *Vaccines (Basel)*. 2021;9(3):242. DOI: <https://doi.org/10.3390/vaccines9030242>
6. Blome S., Gabriel C., Beer M. Modern adjuvants do not enhance the efficacy of an inactivated African swine fever virus vaccine preparation. *Vaccine*. 2014;32(31):3879–3882. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2014.05.051>
7. Stone S., Hess W. Antibody response to inactivated preparations of African swine fever virus in pigs. *American Journal of Veterinary Research*. 1967;28:475–481.
8. Pérez-Núñez D., Sunwoo S. Y., García-Belmonte R., Kim C., Vígara-Astillerio G., Riera E. et al. Recombinant African swine fever virus Arm/07/CBM/c2 lacking CD2v and A238L Is attenuated and protects pigs against virulent Korean Paju strain. *Vaccines*. 2022;10(12):1992. DOI: <https://doi.org/10.3390/vaccines10121992>
9. Abkallo H. M., Svitek N., Oduor B., Awino E., Henson S. P., Oyola S. O. et al. Rapid CRISPR/Cas9 editing of genotype IX African swine fever virus circulating in eastern and central Africa. *Frontiers in Genetics*. 2021;12:733674. DOI: <https://doi.org/10.3389/fgene.2021.733674>
10. Borca M. V., Holinka L. G., Berggren K. A., Gladue D. P. CRISPR-Cas9, a tool to efficiently increase the development of recombinant African swine fever viruses. *Scientific Reports*. 2018;8(1):3154. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21575-8>
11. Krug P. W., Holinka L. G., O'Donnell V., Reese B., Sanford B., Fernandez-Sainz I. et al. The progressive adaptation of a Georgian isolate of African swine fever virus to Vero cells leads to a gradual attenuation of virulence in swine corresponding to major modifications of the viral genome. *Journal of Virology*. 2015;89(4):2324–2332. DOI: <https://doi.org/10.1128/JVI.03250-14>
12. Vlasov M. E., Nefedeva M. V., Kudryashov D. A., Titov I. A. Determination of the 1L-5-6L MGF110 genes influence on the biological properties of the African swine fever virus (*Asfarviridae*; *Asfivirus*) “Volgo-grad/14C” *in vivo*. *Acta Veterinaria*. 2024;74(2):210–221. DOI: <https://doi.org/10.2478/acve-2024-0014>
13. Sereda A. D., Vlasov M. E., Koltsova G. S., Morgunov S. Y., Kudryashov D. A., Sindryakova I. P. et al. Immunobiological characteristics of the attenuated African swine fever virus strain Katanga-350. *Viruses*. 2022;14(8):1630. DOI: <https://doi.org/10.3390/v14081630>

14. Borca M., Ramirez-Medina E., Silva E., Vuono E., Rai A., Pruitt S. et al. Development of a Highly Effective African Swine Fever Virus Vaccine by Deletion of the I177L Gene Results in Sterile Immunity against the Current Epidemic Eurasia Strain. *Journal Virology*. 2020;94(7):e02017-19. DOI: <https://doi.org/10.1128/JVI.02017-19>
15. Guide for the Care and Use of Laboratory Animals: Eighth Edition. Washington, DC: The National Academies Press, 2011. 246 p. URL: <https://grants.nih.gov/grants/olaw/guide-for-the-care-and-use-of-laboratory-animals.pdf>
16. King K., Chapman D., Argilaguet J. M., Fishbourne E., Hutet E., Cariolet R. et al. Protection of European domestic pigs from virulent African isolates of African swine fever virus by experimental immunisation. *Vaccine*. 2011;29(28): 4593–4600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2011.04.052>
17. Fernández-Pinero J., Gallardo C., Elizalde M., Robles A., Gómez C., Bishop R. et al. Molecular diagnosis of African Swine Fever by a new real-time PCR using universal probe library. *Transboundary and Emerging Diseases*. 2013;60(1):48–58. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1865-1682.2012.01317.x>
18. Sereda A. D., Namsrayn S., Balyshev V. M., Vlasov M. E., Sindryakova I. P., Koltsova G., Kolbasov D. V. Seroimmunotyping of African swine fever virus. *FrontiersMicrobiology*. 2023;14:1225587. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1225587>
19. Моргунов Ю. П., Моргунов С. Ю., Бурмакина Г. С., Малоголовкин А. С., Кушнир С. Д., Титов И. А., Мима К. А., Колбасов Д. В. Штамм вируса африканской чумы свиней 8-го серотипа, адаптированный к перевиваемой культуре клеток COS-1: пат. № 2575079 Российская Федерация. № 2014152959/10: заяв. 25.12.2014; опубл. 10.02.2016. Бюл. №4. 6 с. Режим доступа: https://patents.s3.yandex.net/RU2575079C1_20160210.pdf
- Morgunov Yu. P., Morgunov S. Yu., Burmakina G. S., Malogolovkin A. S., Kushnir S. D., Titov I. A., Mima K. A., Kolbasov D. V. Strain of African swine fever virus of the 8th serotype adapted to the transplanted culture of COS-1 cells: Patent RF no. 2575079, 2016. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2575079C1_20160210.pdf
20. Sereda A. D., Vlasov M. E., Koltsova G. S., Morgunov S. Y., Kudrjashov D. A., Sindryakova I. P. et al. Immunobiological Characteristics of the Attenuated African Swine Fever Virus Strain Katanga-350. *Viruses*. 2022;14(8):1630. DOI: <https://doi.org/10.3390/v14081630>
21. Vlasov M. E., Sindryakova I. P., Kudrjashov D. A., Morgunov S. Y., Kolbasova O. L., Lyska V. M. et al. Inoculation with ASFV-Katanga-350 Partially Protects Pigs from Death during Subsequent Infection with Heterologous Type ASFV-Stavropol 01/08. *Viruses*. 2023;15(2):430. DOI: <https://doi.org/10.3390/v15020430>
22. Vlasov M., Sindryakova I., Kudryashov D., Morgunov S., Kolbasova O., Lyska V., et al. Administration Routes and Doses of the Attenuated African Swine Fever Virus Strain PSA-1NH Influence Cross-Protection of Pigs against Heterologous Challenge. *Animals*. 2024;14(9):1277. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani14091277>
23. Abrams C. C., Goatley L., Fishbourne E., Chapman D., Cooke L., Oura Ch. A. et al. Deletion of virulence associated genes from attenuated African swine fever virus isolate OUR T88/3 decreases its ability to protect against challenge with virulent virus. *Virology*. 2013;443(1):99–105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.virol.2013.04.028>
24. Leitão A., Cartaxeiro C., Coelho R., Cruz B., Parkhouse R. M. E., Portugal F. C. et al. The non-haemadsorbing African swine fever virus isolate ASFV/NH/P68 provides a model for defining the protective anti-virus immune response. *Journal of General Virology*. 2001;82(3):513–523. DOI: <https://doi.org/10.1099/0022-1317-82-3-513>
25. Yang X., Zhang X., Zhao X., Yuan M., Zhang K., Dai J. et al. Antibody-Dependent Enhancement: "Evil" Antibodies Favorable for Viral Infections. *Viruses*. 2022;14(8):1739. DOI: <https://doi.org/10.3390/v14081739>
26. Chen W., Zhao D., He X., Liu R., Wang Z., Zhang X. et al. A seven-gene-deleted African swine fever virus is safe and effective as a live attenuated vaccine in pigs. *Science China Life Sciences*. 2020;63:623–634. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11427-020-1657-9>
27. O'Donnell V., Holinka L. G., Gladue D. P., Sanford B., Krug P. W., Lu X. et al. African Swine Fever Virus Georgia Isolate Harboring Deletions of MGF360 and MGF505 Genes Is Attenuated in Swine and Confers Protection against Challenge with Virulent Parental Virus. *Journal of Virology*. 2015;89(11):6048–6056. DOI: <https://doi.org/10.1128/JVI.00554-15>
28. Koltsov A., Sukher M., Krutko S., Belov S., Korotin A., Rudakova S. et al. Construction of the First Russian Recombinant Live Attenuated Vaccine Strain and Evaluation of Its Protection Efficacy Against Two African Swine Fever Virus Heterologous Strains of Serotype 8. *Vaccines (Basel)*. 2024;12(12):1443. DOI: <https://doi.org/10.3390/vaccines12121443>
29. Zheng L., Yan Z., Qi X., Ren J., Ma Z., Liu H. et al. The Deletion of the MGF360-10L/505-7R Genes of African Swine Fever Virus Results in High Attenuation but No Protection Against Homologous Challenge in Pigs. *Viruses*. 2025;17(2):283. DOI: <https://doi.org/10.3390/v17020283>
30. Sawant J., Patil A., Kurle S. A Review: Understanding Molecular Mechanisms of Antibody-Dependent Enhancement in Viral Infections. *Vaccines (Basel)*. 2023;11(7):1240. DOI: <https://doi.org/10.3390/vaccines11071240>
31. Gaudreault N. N., Richt J. A. Subunit Vaccine Approaches for African Swine Fever Virus. *Vaccines (Basel)*. 2019;7(2):56. DOI: <https://doi.org/10.3390/vaccines7020056>
32. Yang X., Sun E., Zhai H., Wang T., Wang S., Gao Yu. et al. The antibodies against the A137R protein drive antibody-dependent enhancement of African swine fever virus infection in porcine alveolar macrophages. *Emerging Microbes & Infections*. 2024;13(1):2377599. DOI: <https://doi.org/10.1080/22221751.2024.2377599>

Сведения об авторах

Власов Михаил Евгеньевич, кандидат вет. наук, заведующий сектором, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Академика Бакулова, стр.1, пос. Вольгинский, Петушинский р-н., Владимирская обл., Российская Федерация, 601125, e-mail: info@ficvim.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8324-3256>, e-mail: VlasovMikhail1993@yandex.ru

Кудряшов Дмитрий Андреевич, начальник группы, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Академика Бакулова, стр.1, пос. Вольгинский, Петушинский р-н., Владимирская обл., Российская Федерация, 601125, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6793-0195>

Синдрякова Ирина Петровна, кандидат биол. наук, заведующий лабораторией, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Академика Бакулова, стр.1, пос. Вольгинский, Петушинский р-н., Владимирская обл., Российская Федерация, 601125, e-mail: info@ficvim.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5947-9402>

Моргунов Сергей Юрьевич, кандидат биол. наук, начальник группы, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Академика Бакулова, стр.1, пос. Вольгинский, Петушинский р-н., Владимирская обл., Российская Федерация, 601125, e-mail: info@ficvim.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9730-3179>

Титов Илья Андреевич, кандидат биол. наук, заведующий лабораторией, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр вирусологии и микробиологии», ул. Академика Бакулова, стр.1, пос. Вольгинский, Петушинский р-н., Владимирская обл., Российская Федерация, 601125, e-mail: info@ficvim.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5821-8980>

Information about the authors

Mikhail E. Vlasov, PhD in Veterinary Science, Head of the Sector, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Academician Bakulov St., Volginsky, Petushinsky District, Vladimir Region, Russian Federation, 601125, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8324-3256>, e-mail: VlasovMikhail1993@yandex.ru

Dmitriy A. Kudryashov, Head of the Group, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Academician Bakulov St., Volginsky, Petushinsky District, Vladimir Region, Russian Federation, 601125, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6793-0195>

Irina P. Sindryakova, PhD in Biology, Head of the Laboratory, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Academician Bakulov St., Volginsky, Petushinsky District, Vladimir Region, Russian Federation, 601125, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5947-9402>

Sergey Yu. Morgunov, PhD in Biology, Head of the Group, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Academician Bakulov St., Volginsky, Petushinsky District, Vladimir Region, Russian Federation, 601125, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9730-3179>

Iliy A. Titov, PhD in Biology, Head of the Laboratory, Federal Research Center for Virology and Microbiology, Academician Bakulov St., Volginsky, Petushinsky District, Vladimir Region, Russian Federation, 601125, e-mail: info@ficvim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5821-8980>

✉ – Для контактов / Corresponding author

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ / MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.917-928>

УДК 631.372



Исследование параметров подвески платформы для селекционно-семеноводческих работ методом имитационного моделирования

© 2025. И. А. Старостин , А. С. Овчаренко, К. С. Дмитриев

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Российская Федерация

Цель исследований – определение и расчет требуемого диапазона работы подвески колесных модулей платформы для селекционно-семеноводческих работ путем исследования ее рабочих характеристик с учетом агрегируемых машин и условий эксплуатации. На основании разработанной математической модели подвески платформы для селекционно-семеноводческих работ и ее расчетным характеристикам была составлена имитационная модель работы подвески платформы в условиях эксплуатации заданного технологического процесса. Имитационная модель содержит параметры неровности дорожного покрытия, а также задаваемую скорость и продольное ускорение платформы. Объекты исследований – упругодемпфирующие характеристики элементов подвески платформы для селекционно-семеноводческих работ. По результатам проведенных исследований определены диапазоны регулировки усилия, жесткости пружин и коэффициента демпфирования амортизатора. Так, диапазон регулировки усилия на упругом элементе каждого технологического модуля шасси должен составлять 5886–25715 Н, диапазон регулировки жесткости пружины 34220–136883 Н/м, диапазон изменения коэффициента демпфирования амортизатора 9043–18086. Исходя из полученных значений диапазонов работы подвески, приведены компоновочные решения конструкции подвески платформы для селекционно-семеноводческих работ: изменение параметров жесткости может быть обеспечено за счет использования двух- или многоступенчатых систем изменения жесткости, а изменение коэффициента демпфирования – посредством управляемого регулятора потока гидравлической жидкости.

Ключевые слова: подвеска транспортного средства, характеристики подвески, селекционная машина, колесный модуль

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № FGUN-2025-0002).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Старостин И. А., Овчаренко А. С., Дмитриев К. С. Исследование параметров подвески платформы для селекционно-семеноводческих работ методом имитационного моделирования. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(4):917–928. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.917-928>

Поступила: 22.01.2025

Принята к публикации: 15.08.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

Research of the platform suspension parameters for breeding and seed production works using the method of simulation modeling

© 2025. Ivan A. Starostin , Alexander S. Ovcharenko, Kirill S. Dmitriev

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

The aim of the study was to determine and calculate the required operating range of the suspension of the platform wheel modules for breeding and seed production by studying its operating characteristics considering the aggregated machines and operating conditions. Based on the developed mathematical model of the platform suspension for breeding and seed production and its design characteristics, a simulation model of the platform suspension operation under the operating conditions of a given technological process was compiled. The simulation model contains the parameters of road surface unevenness, as well as the specified speed and longitudinal acceleration of the platform. The objects of research were the elastic-damping characteristics of the suspension elements of the platform for breeding and seed production. Based on the results of the research, the ranges of force adjustment, spring stiffness and shock absorber damping coefficient were determined. Thus, the range of adjustment of the force on the elastic element of each technological module of the chassis should be 5886–25715 N, the range of adjustment of the spring stiffness 34220–136883 N/m, the range of change of the damping coefficient of the shock absorber 9043–18086. Based on the obtained values of the suspension operating ranges, layout solutions for the design of the platform suspension for breeding and seed production work were given: a change in the stiffness parameters can be ensured by using

two- or multi-stage stiffness change systems, and a change in the damping coefficient - by means of a controlled regulator of the hydraulic fluid flow.

Key words: vehicle suspension; suspension characteristics; breeding machine; wheel module.

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 Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme no. FGUN-2025-0002).

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

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

For citation: Starostin I. A., Ovcharenko A. S., Dmitriev K. S. Research of the platform suspension parameters for breeding and seed production works using the method of simulation modeling. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):917–928. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.917-928>

Received: 22.01.2025

Accepted for publication: 15.08.2025

Published online: 29.08.2025

В соответствии с Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации, утвержденной Указом Президента от 21 января 2020 года № 20¹, необходимо достигнуть уровня самообеспечения по семенам основных сельскохозяйственных культур отечественной селекции не менее 75 %. По данным Минсельхоза России, в 2024 году уровень данного показателя составляет 65,2 %. Постоянно повышающиеся требования к качеству и объему селекционной продукции диктуют потребность в усовершенствовании процессов ее производства [1]. В текущей сложной геополитической ситуации вопрос производства необходимого объема семян отечественной селекции является одним из ключевых для обеспечения продовольственной безопасности страны.

В реализации селекционной и семеноводческой деятельности немаловажную роль играет технико-технологическое обеспечение работ [2, 3]. При этом необходимо учитывать тот факт, что селекционно-семеноводческая техника является специализированной и в большинстве случаев создается для решения определенных задач в сфере механизации и автоматизации селекционных работ, в связи с чем ее стоимость достаточно высока. Одной из особенностей эксплуатации селекционной техники, в частности селекционных зерноуборочных комбайнов, является низкая годовая загрузка. В большинстве случаев селекционные зерноуборочные комбайны используются не более 200 ч в год (приведенный в [4] пример показывает, что при соблюдении агротехнических сроков уборки зерновых культур селекционный комбайн эксплуатируется не более чем 30 дней в году), что при достаточно высокой их стоимости приводит к низкой экономической эффективности применения данной техники.

С целью повышения экономической эффективности селекционно-семеноводческих работ

предлагается обеспечить повышение годовой загрузки отдельных элементов селекционного комбайна и, соответственно, снижение себестоимости эксплуатации за счет их использования при выполнении других отличающихся по срокам проведения от уборочных работ технологических операций в селекции и семеноводстве путем создания платформы для агрегатирования с машинами для предпосевной подготовки, посева и уборки селекционных делянок.

Цель исследований – определение и расчет требуемого диапазона работы подвески колесных модулей платформы для селекционно-семеноводческих работ путем исследования ее рабочих характеристик с учетом агрегируемых машин и условий эксплуатации.

Научная новизна – использование методов имитационного моделирования для исследования параметров подвески колесных модулей платформы с учетом агрегатирования с имеющимися различными массогабаритными характеристиками навесными селекционными машинами.

Материал и методы. Разрабатываемая платформа базируется на гибридной энергетической установке и универсальных технологических модулях шасси, имеющих расширенный спектр применения за счет возможности их использования при создании различных тягово-энергетических и транспортно-технологических средств сельскохозяйственного назначения. Разрабатываемую платформу с универсальными технологическими модулями шасси предполагается использовать в качестве тягово-энергетического средства для выполнения технологических операций в агрегате с машинами для предпосевной подготовки почвы, посева и уборки селекционных делянок зерновых, зернобобовых, технических и других культур, погрузочно-разгрузочных [5] и транспортных работ в селекции и семеноводстве, а также в других отраслях.

¹Указ Президента РФ от 21 января 2020 г. N 20 "Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации" [Электронный ресурс].

URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45106> (дата обращения: 12.03.2025)

С учетом массогабаритных параметров адаптера для уборки селекционных делянок, в качестве которого рассматривается разрабатываемый в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ электрический селекционный комбайн [6], из конструкции которого исключаются энергетическая установка, блоки аккумуляторных батарей, блоки силовой электроники, трансмиссия и ходовая система, разработана конструкция полно-

приводной полноуправляемой платформы, базирующейся на применении однотипных универсальных технологических модулей шасси с автоматизированным электрическим приводом (рис. 1). Процесс создания агрегата из полноприводной полноуправляемой платформы с технологическими модулями шасси и адаптера для уборки селекционных делянок представлен на рисунке 2.

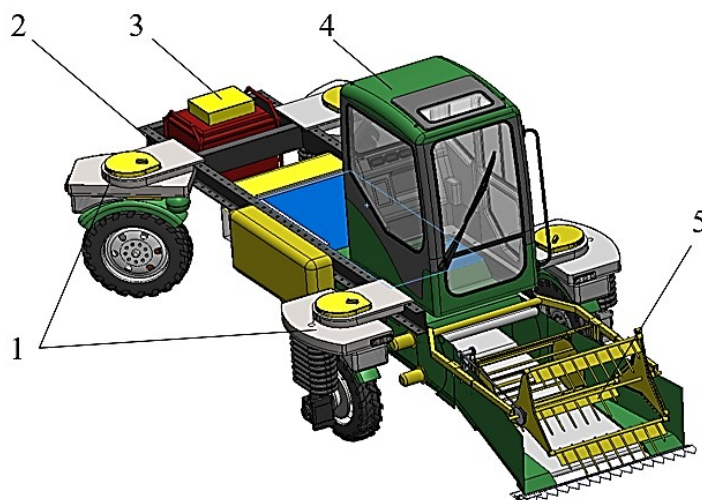


Рис. 1. Общий вид полноприводной полноуправляемой платформы с технологическими модулями шасси и адаптером для уборки селекционных делянок: 1 – технологические модули шасси; 2 – рама платформы; 3 – гибридная энергетическая установка; 4 – пост управления; 5 – адаптер для уборки селекционных делянок /

Fig. 1. General view of the all-wheel drive platform with technological chassis modules and an adapter for harvesting selection plots: 1 – technological chassis modules; 2 – platform frame; 3 – hybrid power plant; 4 – control station; 5 – adapter for harvesting selection plots

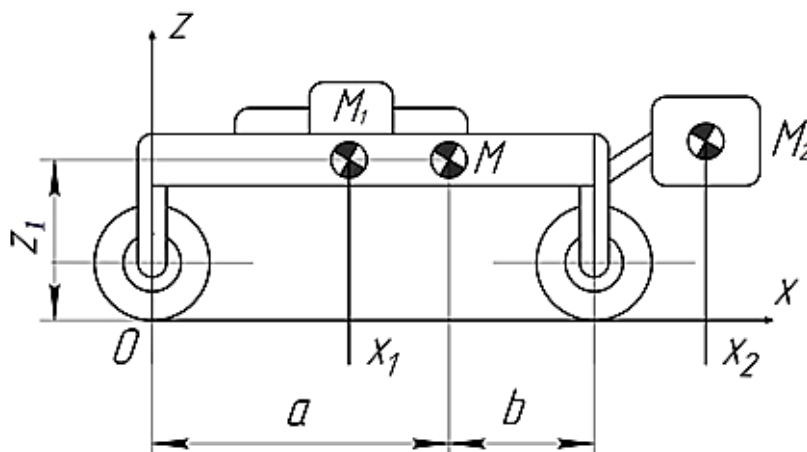


Рис. 2. Схема распределения центров масс платформы и навесной машины: M – суммарный центр масс всей платформы с учетом всех агрегатов; M_2 – центр масс навесной машины; M_1 – центр масс самой платформы без навесной машины; a – расстояние от передних колес до центра тяжести; b – расстояние от задних колес до центра тяжести; x_1 – координата центра масс самой платформы на оси x относительно начала координат от передних колес; x_2 – координата суммарного центра масс всей платформы с навесной машиной на оси x , относительно начала координат от передних колес; z_1 – расстояние суммарного центра масс платформы относительно дорожной поверхности /

Fig. 2. Diagram of mass centers of the platform and attachments: M – total center of mass of the entire platform taking into account all units; M_2 – center of mass of attachments; M_1 – center of mass of the platform itself without attachments; a – distance from the front wheels to the center of gravity; b – distance from the rear wheels to the center of gravity; x_1 – coordinate of the center of mass of the platform itself on the x -axis, relative to the origin from the front wheels; x_2 – coordinate of the total center of mass of the entire platform with attachments on the x -axis, relative to the origin from the front wheels; z_1 – distance of the total center of mass of the platform relative to the road surface

Для оптимальной работы платформы в тяговом режиме в технологических сельскохозяйственных операциях необходимо придерживаться параметров нагрузки по осям для тяговой техники [7]. Для тракторов с классической рамой при колёсной формуле 4К2 оптимальным считается соотношение нагрузки по осям 35 на 65 %, а при колёсной формуле 4К4 – 40 на 60 %. Для разрабатываемой платформы принят диапазон соотношений нагрузки по осям с гранич-

ными значениями по передней и задней осями соответственно от 50 на 50 % до 30 на 70 %.

Соотношение нагрузки по осям пустой разрабатываемой платформы принимаем 50 на 50 %. Схема для определения центра масс платформы и соотношения нагрузки по осям при агрегатировании с рассматриваемыми навесными машинами представлена на рисунке 2, в таблице 1 приведены технические характеристики платформы с навесными машинами.

Таблица 1 – Технические характеристики платформы при агрегатировании с рассматриваемыми навесными машинами /

Table 1 – Technical characteristics of the platform when aggregated with the considered mounted machines

Наименование навесной машины / Name of machine	Полная масса платформы, М, кг / Full platform weight, M, kg	Расстояние от передних колес до центра тяжести, а, мм / Distance from the front wheels to the center of gravity, a, mm	Расстояние от задних колес до центра тяжести, b, мм / Distance from rear wheels to center of gravity, b, mm	Центр масс по z, мм / Center of mass along z, mm	Масса навесного орудия, кг / Weight of mounted implement, kg
Без навесной машины / Without mounted machine	3000	1500	1500	600	0
КУН-2,5	3250	1742,3	1257,7	800	250
СТ-7	3370	1829,4	1170,6	750	370
ФНС-1,5	3450	1897,8	1102,2	700	450
КБМ-2,1	3450	1923,9	1076,1	800	450
Plotseed XL	3600	2000	1000	850	600
Адаптер для уборки селекционных делянок / Adapter for harvesting selection plots	4000	1500	1500	600	1000

С целью обоснования параметров подвески технологических модулей шасси предлагается произвести ее расчет и моделирование с учетом конструкции и параметров платформы, а также характеристик агрегируемых с платформой навесных селекционных машин и адаптера для уборки селекционных делянок.

Для определения диапазона параметров подвески технологических модулей шасси разработана математическая модель работы подвески и ее имитационная интерпретация, позволяющая оценить уровень виброускорений поддрессоренных масс платформы целиком [8, 9]. Из ранее описанного примера следует, что для создания динамической модели [10, 11, 12] работы подвески платформы необходимо рассмотреть работу подвески для каждого из колес.

Для оценки физических свойств подвески элементы платформы были разделены

на поддрессоренную массу (кузов, аккумуляторная батарея, навесная машина и т. д.) и неподдрессоренную (колеса, электродвигатели, тормозная система и т. д.). Демпфирующие свойства подвески² были описаны для каждого из колес и составили связки систем “амортизатор-пружина”. На рисунке 3 изображена упрощенная модель подвески платформы с пневматическими колесами.

Уравнение равновесия системы подвески платформы составлено на основании общеизвестных закономерностей классической механики и выглядит следующим образом:

$$Fm_{01} - Fk_1 - Fc_1 + Fk_{01} + Fc_{01} = 0; \quad (1)$$

где Fm_{01} – сила, действующая на неподдрессоренную массу; Fk_1 – сила упругой реакции пружины; Fc_1 – сила демпфирования амортизатора; Fk_{01} – сила упругой реакции шины; Fc_{01} – сила демпфирования шины.

²Горобцов А. С., Поляков Ю. А., Лебедев А. И. Влияние коэффициентов демпфирования адаптивных гидропневматических подвесок на виброн нагруженность автомобиля. Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2014;(2(95)):122–132. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=inwvyn> EDN: SDFHFB

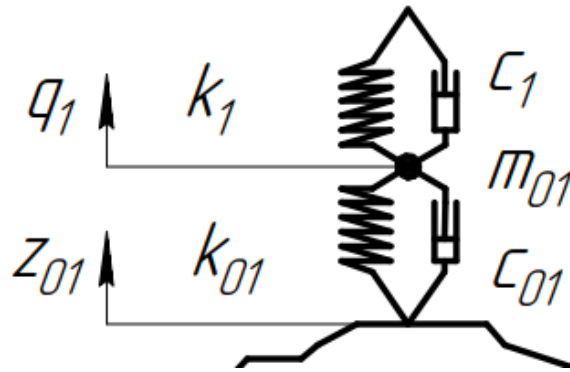


Рис. 3. Упрощенная модель подвески платформы: m_{01} – непродессоренная масса платформы; c_1 – коэффициенты демпфирования амортизаторов подвески; c_{01} – коэффициенты демпфирования шин; k_1 – коэффициент упругой реакции элемента подвески (жесткости); k_{01} – коэффициент упругой реакции шины (жесткости); z_{01} – вертикальная координата перемещения колеса; q_1 – функция возмущающей силы, действующей на колесо /

Fig. 3. Simplified dynamic model of platform suspension: m_{01} – unsprung mass of the platform; c_1 – suspension shock absorber damping coefficients; c_{01} – tire damping coefficient; k_1 – suspension element elastic response coefficient (stiffness); k_{01} – tire elastic response coefficient (stiffness); z_{01} – vertical coordinate of wheel displacement; q_1 – function of the disturbing force acting on the wheel.

Запись силы, действующей на непродессоренную массу, сил упругой реакции и демпфирования шины в общем и дифференциальном виде будет выглядеть следующим образом:

$$Fm_{01} = m_{01}a = m_{01}\ddot{z}_{01}; \quad (2)$$

$$Fk_{01} = k_{01}\dot{x} = k_{01}(\dot{\Delta}z) = k_{01}(\dot{z}_{01} - \dot{q}_1); \quad (3)$$

$$Fc_{01} = c_{01}\dot{x} = c_{01}(\dot{\Delta}z) = c_{01}(\dot{z}_{01} - \dot{q}_1), \quad (4)$$

где a – ускорение; x – координата вертикального перемещения; z – ось вертикальных перемещений; Δz – расстояние перемещения по оси вертикальных перемещений z .

В таком случае уравнение равновесия системы подвески платформы в дифференциальном виде будет выглядеть следующим образом:

$$m_{01}\ddot{z}_{01} - k_1(\dot{z} - \dot{z}_{01}) - c_1(z - z_{01}) + k_{01}(\dot{z}_{01} - \dot{q}_1) + c_{01}(z_{01} - q_1) = 0. \quad (5)$$

$$M\ddot{z} + c_1(\dot{z} - a \tan \dot{\theta} - \dot{z}_{01}) + k_1(\dot{z} - a \tan \dot{\theta} - \dot{z}_{01}) + c_2(\dot{z} + b \tan \dot{\theta} - \dot{z}_{02}) + k_2(z + b \tan \theta - z_{02}) + c_3(\dot{z} - b \tan \dot{\theta} - \dot{z}_{03}) + k_3(\dot{z} - b \tan \dot{\theta} - \dot{z}_{03}) + c_4(\dot{z} - b \tan \dot{\theta} - \dot{z}_{03}) + k_4(\dot{z} - b \tan \dot{\theta} - \dot{z}_{03}) = 0; \quad (6)$$

$$m_{01}\ddot{z}_{01} - c_1(\dot{z} - a \tan \dot{\theta} - \dot{z}_{01}) - k_1(\dot{z} - a \tan \dot{\theta} - \dot{z}_{01}) + c_{01}(\dot{z}_{01} - \dot{q}_1) + k_{01}(\dot{z}_{01} - \dot{q}_{01}) = 0; \quad (7)$$

$$m_{02}\ddot{z}_{02} - c_2(\dot{z} + b \tan \dot{\theta} - \dot{z}_{02}) - k_2(z + b \tan \theta - z_{02}) + c_{02}(\dot{z}_{02} - \dot{q}_2) + k_{02}(z_{02} - q_2) = 0; \quad (8)$$

$$m_{03}\ddot{z}_{03} - c_3(\dot{z} - b \tan \dot{\theta} - \dot{z}_{03}) - k_3(\dot{z} - b \tan \dot{\theta} - \dot{z}_{03}) + c_{03}(\dot{z}_{03} - \dot{q}_3) + k_{03}(z_{03} - q_3) = 0; \quad (9)$$

$$m_{04}\ddot{z}_{04} - c_4(\dot{z} + b \tan \dot{\theta} - \dot{z}_{04}) - k_4(\dot{z} + b \tan \dot{\theta} - \dot{z}_{04}) + c_{04}(\dot{z}_{04} - \dot{q}_4) + k_{04}(z_{04} - q_4) = 0. \quad (10)$$

На основании приведенной математической модели на базе программного обеспечения MATLAB Simulink разработана имитационная динамическая модель. Верхнеуровневый вид имитационной динамической модели движения платформы представлен на рисунке 5.

Модель подвески имеет два входных блока: первый – неровность дороги (ямы и

Подвеска технологического модуля шасси должна обеспечивать плавность движения платформы с навесными сельскохозяйственными машинами и адаптером для уборки селекционных делянок при преодолении неровностей во время движения [13], а также изменение дорожного просвета платформы в зависимости от выполняемой технологической операции.

Составлена динамическая математическая модель движения платформы для имитационного моделирования, представленная на рисунке 4. Модель включает в себя степени свободы наклона и отскока корпуса.

Математическая модель работы подвески платформы описывается следующими уравнениями динамики, составленными на основании закономерностей классической механики, приведённых ранее в уравнениях (1)–(5):

выпуклости). Эта функция имитирует перемещение колеса по вертикальной оси, тем самым оказывая воздействие на трансмиссию. Второй входной сигнал – горизонтальная сила, действующая через центр колес и возникающая в результате маневров торможения или ускорения. Этот входной сигнал появляется только как момент относительно приводной оси.

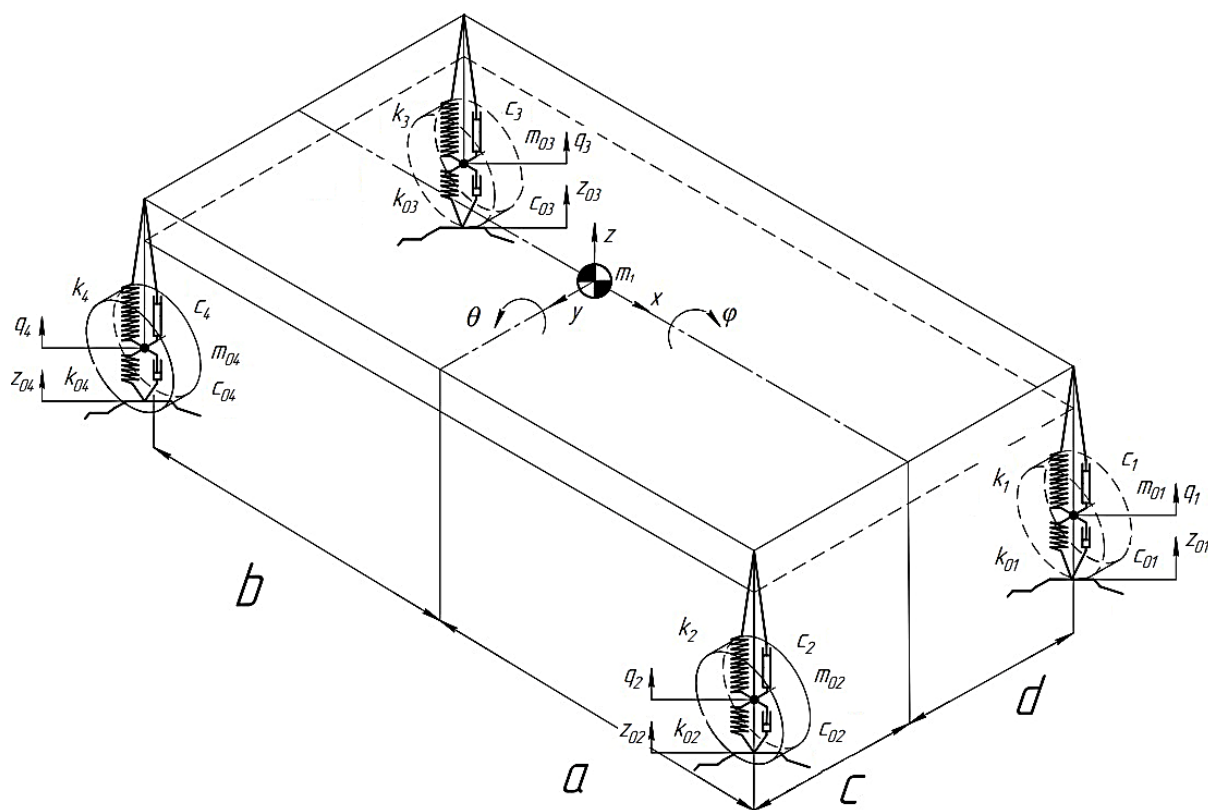


Рис. 4. Динамическая модель движения платформы для имитационного моделирования: m_1 – подвесенная масса платформы (масса центра тяжести); a – расстояние от передних колес до центра тяжести; b – расстояние от задних колес до центра тяжести; θ – продольное угловое перемещение рамы платформы относительно центра масс; φ – поперечное угловое перемещение рамы платформы относительно центра масс; $m_{01}, m_{02}, m_{03}, m_{04}$ – неподдрессоренные массы переднего левого, переднего правого, заднего левого и заднего правого колесных модулей; c_1, c_2, c_3, c_4 – коэффициенты демпфирования амортизаторов подвески переднего левого, переднего правого, заднего левого и заднего правого колесных модулей; $c_{01}, c_{02}, c_{03}, c_{04}$ – коэффициенты демпфирования шин переднего левого, переднего правого, заднего левого и заднего правого колесных модулей; k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты упругой реакции элементов подвески переднего левого, переднего правого, заднего левого и заднего правого колесных модулей соответственно; $k_{01}, k_{02}, k_{03}, k_{04}$ – коэффициенты упругой реакции шин переднего левого, переднего правого, заднего левого и заднего правого колесных модулей; $z_{01}, z_{02}, z_{03}, z_{04}$ – вертикальные координаты перемещения переднего левого, переднего правого, заднего левого и заднего правого колесных модулей; q_1, q_2, q_3, q_4 – функции возмущающих сил, действующих на переднее левое, переднее правое, заднее левое и заднее правое колесные модули /

Fig. 4. Dynamic model of platform motion for simulation modeling: m_1 – sprung mass of the platform (mass of the center of gravity); a – distance from the front wheels to the center of gravity; b – distance from the rear wheels to the center of gravity; θ – longitudinal angular displacement of the platform frame relative to the center of mass; φ – transverse angular displacement of the platform frame relative to the center of mass; $m_{01}, m_{02}, m_{03}, m_{04}$ – unsprung masses of the front left, front right, rear left and rear right wheel modules; c_1, c_2, c_3, c_4 – damping coefficient of the suspension shock absorbers of the front left, front right, rear left and rear right wheel modules; $c_{01}, c_{02}, c_{03}, c_{04}$ – damping coefficient of the tires of the front left, front right, rear left and rear right wheel modules; k_1, k_2, k_3, k_4 – elastic reaction coefficients of the suspension elements of the front left, front right, rear left and rear right wheel modules, respectively; $k_{01}, k_{02}, k_{03}, k_{04}$ – coefficients of elastic reaction of tires of front left, front right, rear left and rear right wheel modules; $z_{01}, z_{02}, z_{03}, z_{04}$ – vertical coordinates of movement of front left, front right, rear left and rear right wheel modules; q_1, q_2, q_3, q_4 – functions of disturbing forces acting on front left, front right, rear left and rear right wheel modules

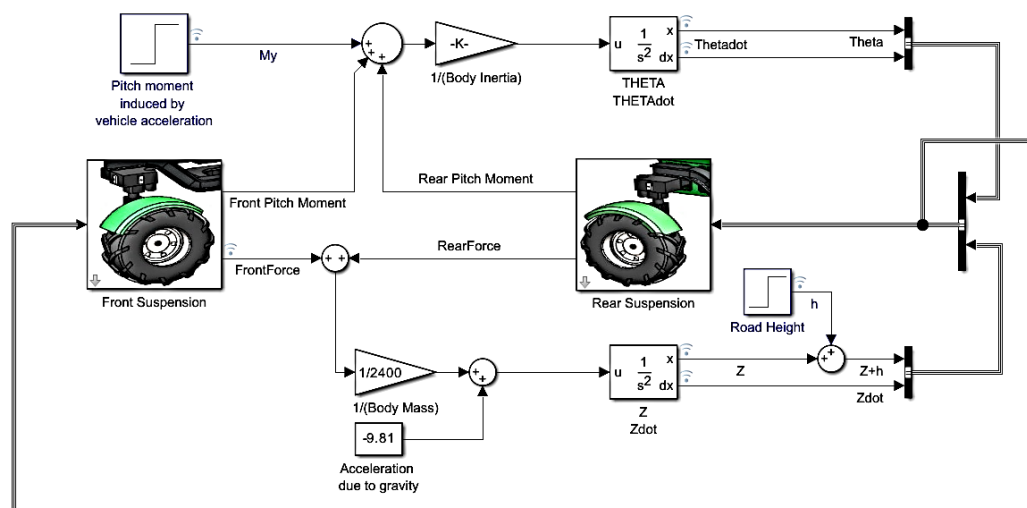


Рис. 5. Модель подвески колесной платформы с четырьмя колесными модулями, имитационная интерпретация динамической модели движения платформы /

Fig. 5. Model of suspension of wheeled platform with four wheeled modules, simulation interpretation of the dynamic model of platform movement

Математические зависимости передней и задней подвески отображены соответствующими блоками – передняя подвеска $q_1 + q_2$ и задняя подвеска $q_3 + q_4$.

Использование имитационной модели позволяет быстро адаптировать конфигурацию платформы с разными агрегатами и проверять ее на соответствие требуемым параметрам по частоте колебания и вертикальным ускорениям.

Для удовлетворения требования плавности хода подвеска должна обеспечивать определенный закон изменения вертикальной реакции на колесо в зависимости от прогиба, которая называется упругой характеристикой подвески. Приведенный расчет характеристик подвески: статический прогиб подвески, усилие на упругом элементе для колеса, жесткость пружины, коэффициент демпфирования амортизатора – приводится по следующей методике³.

Статический прогиб подвески определяется по формуле:

$$f_{ст} = \frac{g}{4\pi^2 v^2}, \quad (11)$$

где v – частота собственных колебаний подвесочных масс, Гц. Принимаем $v = 1,2$ Гц.

Согласно вышеописанной методике, необходимый ход передней и задней подвесок должен находиться в диапазоне 0,051–0,087 м; с учетом достаточно длинной колесной базы платформы – 3,0 м принимаем величину хода подвески 0,09 м, т. е. 90 мм.

Усилие на упругом элементе для переднего колеса при статическом прогибе рассчитывается исходя из значений нагрузки на одно колесо:

$$P_{ст} = \frac{rG_a}{2}, \quad (12)$$

где G_a – вес платформы с учетом развесовки f/r , кг.

Жесткость пружины определяется по формуле:

$$k = \frac{P_{ст}}{f_{ст}}. \quad (13)$$

Коэффициент демпфирования амортизатора колесных модулей находится по формуле:

$$c = 2 \cdot \pi \cdot K_d \cdot v \cdot \frac{fM}{2}, \quad (14)$$

где K_d – коэффициент динамичности колесной машины, для малогабаритных грузовых автомобилей и легковых автомобилей принимают значение 2.

Частота колебаний платформы f (Гц) при агрегатировании с различными навесными машинами определяется по общеизвестной формуле расчета периода колебаний:

$$f = \frac{1}{T_{cp}}. \quad (15)$$

Максимальное вертикальное ускорение платформы a_z (м/с²) определяется по общеизвестной формуле:

$$a_z = \frac{dz}{dt}. \quad (17)$$

Методом имитационного моделирования проведен анализ работы подвески платформы с рассчитанными параметрами при движении платформы по неровной ухабистой дороге.

³Шарипов В. М. Конструирование и расчет тракторов: учебник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2009. 752 с.

Для определения необходимых параметров подвески, в частности, жесткости упругих элементов и коэффициентов демпфирования амортизаторов, приняты следующие исходные характеристики платформы: полная масса платформы без навесного составляет 3000 кг; неподрессоренная масса передних колес $m_{01} + m_{02} = 300$ кг; неподрессоренная масса задних колес суммарно $m_{03} + m_{04} = 300$ кг; расстояние от передних колес до центра тяжести: $a = 1,5$ м; расстояние от задних колес до центра тяжести $b = 1,5$ м; коэффициент демпфирования шин $c_{01} = c_{02} = c_{03} = c_{04} = 0,022$; коэффициент упругой реакции (жесткости) шин $k_{01} = k_{02} = k_{03} = k_{04} = 0,17$; центр масс платформы находится на расстоянии $z = 0,6$ м относительно опорной поверхности.

При осуществлении расчетов и имитационного моделирования рассматривались следующие селекционные машины: культиваторы для сплошной обработки блочно-модульного типа КБМ-2,1 и универсальный типа КУН-2,5; навесная фреза ФНС-1,5; сеялка травяная семирядная СТ-7; сеялка сплошного посева Plotseed XL; навесной уборочный модуль, представляющий собой жатвенную часть и молотильно-сепарирующее устройство селекционного комбайна Fortschritt MDW Hege 130.

В соответствии с ГОСТ Р 50597-2017⁴ значение глубины ямы принято 50 мм, то есть рассматриваются случаи, в которых колесо плат-

формы провалится на 50 мм при попадании в яму и поднимется на 50 мм при выезде из ямы [14, 15].

Результаты и их обсуждение. С учетом принятых параметров платформы, технологических модулей шасси и навесных машин методом имитационного моделирования определены усилия на упругих элементах подвески исходя из данных, представленных в таблице 1. Диаграмма изменения жесткости подвески платформы по осям в различных рассмотренных конфигурациях представлена на рисунке 6. Диаграмма изменения коэффициента демпфирования подвески платформы по осям в различных рассмотренных конфигурациях представлена на рисунке 7.

Анализ приведенных на графиках данных показывает, что при агрегатировании платформы с рассматриваемыми сельскохозяйственными машинами значения жесткости передней подвески платформы изменяется в диапазоне 34220...95552 Н/м, а задней подвески – 65552...136883 Н/м. Коэффициент демпфирования передних амортизаторов изменяются в диапазоне – 9043...16673, задних – 11304...18086. Поскольку в конструкции платформы предполагается использование на обеих осях однотипных колесных модулей, то диапазон жесткости для них должен составлять 34220...136883 Н/м, коэффициента демпфирования – 9043...18086.

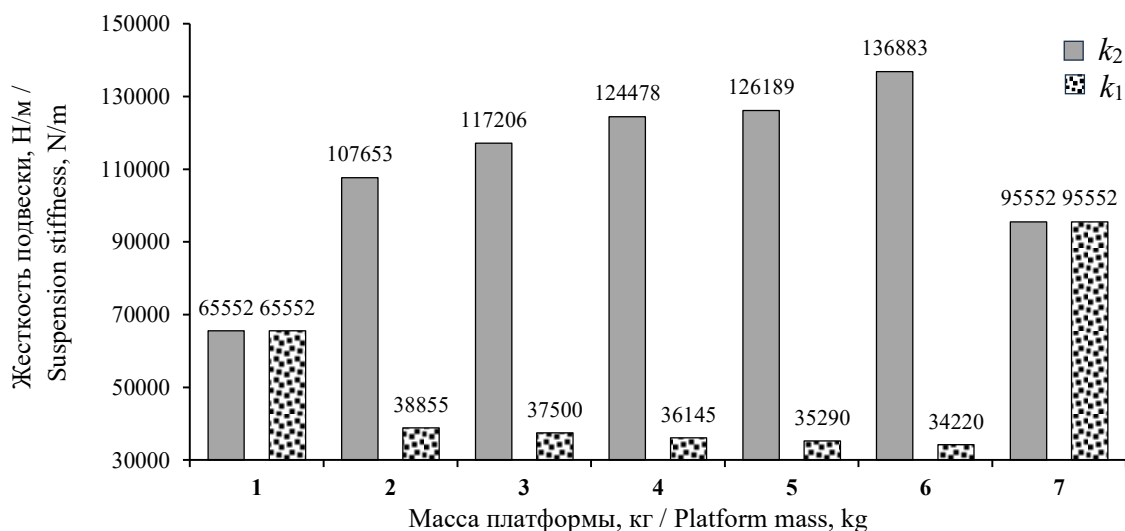


Рис. 6. Диаграмма зависимости жесткости подвески платформы по осям: k_1 – жесткость передних пружин; k_2 – жесткость задних пружин /

Fig. 6. Diagram of the dependence of the platform suspension stiffness on the axles relative: k_1 – stiffness of the front springs; k_2 – stiffness of the rear springs

⁴ГОСТ Р 50597-2017. Автомобильные дороги и улицы. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. М.: Стандартинформ, 2017. 31 с.

URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200147085>

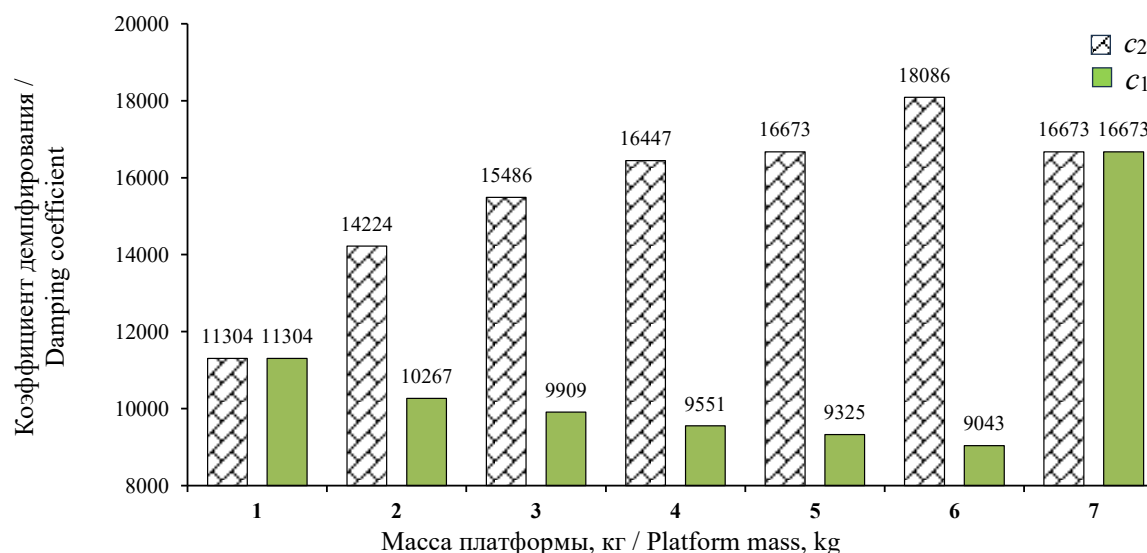


Рис. 7. Диаграмма зависимости коэффициента демпфирования подвески платформы по осям: c_1 – коэффициент демпфирования передних амортизаторов; c_2 – коэффициент демпфирования задних амортизаторов /
Fig. 7. Diagram of the dependence of the damping coefficient of the platform suspension on the axles relative: c_1 – damping coefficient of the front shock absorbers; c_2 – damping coefficient of the rear shock absorbers

С увеличением приходящейся на заднюю навеску массы и плеча приложения силы существенно возрастает нагрузка на заднюю подвеску платформы, что требует соответствующего повышения ее жесткости и коэффициента демпфирования. Увеличение этих параметров необходимо для обеспечения устойчивости платформы и предотвращения избыточных продольных колебаний при движении, возникающих в результате смещения центра масс и изменения динамических нагрузок. Учитывая значительное перераспределение нагрузки между передней и задней осями при агрегатировании с различными навесными машинами, необходимо поддерживать соответствующее планируемой нагрузке давление в пневматических шинах в зависимости от используемого типоразмера шин.

Оптимизация жесткости и демпфирующих характеристик задней и передней подвесок в широком диапазоне возможна за счет применения гидропневматической подвески с много-режимной регулировкой параметров. В частности, использование двух- или многоступенчатых систем изменения жесткости, оснащенных управляемым регулятором потока гидравлической жидкости, позволяет динамически адаптировать работу подвески под изменяющиеся условия эксплуатации⁵. Такая система обеспечивает возможность активного изменения характеристик демпфирования и жесткости

в зависимости от текущих параметров движения, распределения нагрузки и внешних воздействий.

Таким образом, применение адаптивных гидропневматических систем с регулируемой жесткостью и демпфированием обеспечивает комплексное решение задачи стабилизации платформы, снижая уровень продольных колебаний и улучшая характеристики управляемости транспортного средства.

Результаты расчетов частоты колебаний и максимального вертикального ускорения платформы при агрегатировании с различными навесными машинами представлены в таблице 2.

Главное воздействие на плавность хода и комфорт оператора или сохранность хрупкого груза, находящегося на разрабатываемой платформе, оказывают два вида колебаний: поступательное вертикальное (подпрыгивание) и угловое продольное (галомирование). Другими колебаниями при расчетной оценке плавности хода можно пренебречь для упрощения исследования данного явления, что позволит рассматривать колебания платформы, как плоской фигуры, имеющей форму боковой поверхности корпуса платформы в одной вертикальной плоскости. Колебания в вертикальной плоскости зависят от жесткости упругого элемента подвески и эластичности шин. Так как упругий элемент подвески после наезда на препятствие продолжает совершать затухающие колебания, то для гашения этих колебаний в состав подвески вводят амортизаторы.

⁵Шарипов В. М. Указ. соч.

Таблица 2 – Результаты расчета подвески платформы при агрегатировании с различными навесными машинами / Table 2 – Results of calculating the platform suspension when aggregating with various mounted attachments

<i>Наименование навесных машин / Name of the mounted machine</i>	<i>Полная масса платформы, М, кг / Total platform mass, M, kg</i>	<i>Частота колебаний платформы, f, Гц / The oscillation frequency of the circuit board, f, Hz</i>	<i>Максимальное вертикальное ускорение платформы, а_з, м/с² / Maximum vertical acceleration of the platform, a_z, m/s²</i>
Без навесной машины / Without mounted machine	3000	1,17	1,2
КУН-2,5	3250	1,21	1,2
СТ-7	3370	1,17	0,11
ФНС-1,5	3450	1,19	1
КБМ-2,1	3450	1,12	1,33
Plotseed XL	3600	2,04	2,25
Адаптер для уборки селекционных делянок / Adapter for harvesting selection plots	4000	1,88	2

Наиболее комфортная для человека частота колебаний – это естественная для нас, которую мы испытываем при ходьбе, то есть примерно 1,5–2,5 Гц. Достижение этого параметра обеспечивается соответствием жесткости упругого элемента приходящейся на него массе кузова с грузом и пассажирами [16]. Расчеты показали, что при различных наименованиях навесных сельскохозяйственных машин частоты колебаний платформы составили 1,17...2,04 Гц, что находится в пределах допустимых значений, обозначенных ранее для колесных машин.

С учетом изменяемой компоновки разрабатываемой платформы в зависимости от технологической операции примем допущение, что вибрационная нагруженность на месте оператора равна вибрационной нагруженности в центре масс всей платформы. Результаты имитационного моделирования показали, что вертикальные ускорения не превышают опасных для человека значений при длительном воздействии (например, при 7-часовой рабочей смене) в 2,2 g, и платформа отвечает условиям безопасности и комфорта как для оборудования, так и для оператора.

Заключение. В результате проведенных исследований на основании выбранного компоновочного решения составлены математическая и динамическая модели подвески универсальной платформы и проведено имита-

ционное моделирование ее работы при агрегатировании с различными сельскохозяйственными навесными машинами, при этом нагрузка на каждый технологический модуль шасси варьировала в диапазоне 5886...25715 Н. По результатам имитационного моделирования установлено, что при условии использования однотипных колесных модулей диапазон их жесткости должен составлять 34220...136883 Н/м, а коэффициента демпфирования – 9043...18086.

Для регулирования жесткости подвески колесных модулей предложено использовать двух- или многоступенчатые системы коррекции жесткости, а для изменения коэффициента демпфирования – управляемый регулятор потока гидравлической жидкости, что обеспечивает возможность адаптации характеристик подвески к текущим параметрам движения, распределению нагрузки и внешним воздействиям.

Результаты имитационного моделирования показали, что частоты колебаний платформы при агрегатировании с рассматриваемыми сельскохозяйственными машинами находятся в пределах допустимых значений, а вертикальные ускорения не превышают опасных для человека значений при длительном воздействии, на основании чего можно утверждать, что платформа отвечает условиям безопасности и комфорта как для оборудования, так и для оператора.

Список литературы

1. Сайфетдинов А. Р., Бершицкий Ю. И., Сайфетдинова П. В. Структурно-функциональный анализ и обоснование направлений развития системы селекции и семеноводства в России. Международный сельскохозяйственный журнал. 2024;(1(397)):67–73. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=invwyn> EDN: INVWYN

2. Лобачевский Я. П., Лачуга Ю. Ф., Измайлов А. Ю., Шогенов Ю. Х. Научно-технические достижения агроинженерных научных организаций в условиях цифровой трансформации сельского хозяйства. Техника и оборудование для села. 2023;(4(310)):2–5. Режим доступа: <https://elibrary.ru/kigzdf> EDN: KIGZDF
3. Лобачевский Я. П., Дорохов А. С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021;(15(4)):6–10. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10> EDN: YFRZDV
4. Измайлов А. Ю., Евтюшенков Н. Е., Рожин В. Ф. Разработка математического аппарата для моделирования технологий по транспортированию селекционного урожая. Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2015;(6):14–16. Режим доступа: <https://elibrary.ru/UOSUON> EDN: UOSUON
5. Старостин И. А., Дмитриев К. С., Овчаренко А. С., Овчинников Е. В. Концепция универсальной платформы для погрузочно-разгрузочных работ. Экология промышленного производства. 2024;(3(127)):54–60. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=69208745> EDN: SIAEDZ
6. Чаплыгин М. Е., Годжаев З. А., Уютов С. Ю. Обоснование параметров и режимов работы электроприводов базовых рабочих органов селекционного комбайна. Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2024;17(1(80)):112–124. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67314848> EDN: STZEJA
7. Музафаров Э. Р., Филькин Н. М. Математическое обоснование предельного значения касательной силы тяги на ведущих колесах для транспортно-технологических машин. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение». 2023;23(4):32–40. DOI: <https://doi.org/10.14529/engin230403> EDN: ZXKZHP
8. Аксенов А. Г., Овчаренко А. С., Дмитриев К. С., Кондрахов Д. Д., Волков А. О. Цифровой двойник шасси грузового электротранспортного средства сельскохозяйственного назначения. Известия Нижегородского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2024;(3(75)):309–320. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68635257> EDN: MHYMVJ
9. Дубровский А. Ф., Алюков А. С., Алюков С. В., Прокопьев К. В. Сравнительный анализ методов аппроксимации рабочей характеристики упругого элемента подвески автомобиля. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение». 2017;(4):5–12. DOI: <https://doi.org/10.14529/engin170401> EDN: ZXNZKN
10. Кузьмин В. А., Федоткин Р. С., Крючков В. А. Разработка имитационной модели для оценки эффективности виброзащиты системы поддрессирования колесного сельскохозяйственного трактора класса 4. Инновации в сельском хозяйстве. 2018;(2(27)):340–347. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35685686> EDN: YASXVB
11. Кузьмин В. А., Федоткин Р. С., Крючков В. А. Искусственная нейронная сеть для обоснования параметров ходовых систем тракторов. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017;(4):24–30. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29898802> EDN: ZEHDZF
12. Вольская Н. С., Чичекин И. В. Корректировка расчетов на плавность хода колесных машин по их динамическим моделям. Известия МГТУ МАМИ. 2013;1(2(16)):241–248. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21283363> EDN: RXTIQV
13. Юхин И. А., Успенский И. А. Математическая модель движения универсального транспортного средства по полю. Научный журнал КубГАУ. 2013;(92):381–387. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20799886> EDN: RNEGQD
14. Плахов С. А., Пономарев А. И., Сидоров М. В. Применение моделирования для оценки сцепных свойств универсального колёсного движителя. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024;(8):535–540. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=73162468> EDN: ППФК
15. Дмитриева Т. Д., Котков А. С., Васильев А. А., Сидоров М. В., Пономарев А. И. Исследование взаимодействия колеса с опорным основанием. Инженерный вестник Дона. 2023;(1(97)):214–222. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50406335> EDN: EBANUR
16. Адылин И. П., Малащенко Ю. А. Вибрации сельскохозяйственной техники. Вестник Брянской ГСХА. 2021;(3(85)):51–55. DOI: <https://doi.org/10.52691/2500-2651-2021-85-3-51-55> EDN: OKFLYG

References

1. Sayfetdinov A. R., Bershitskiy Yu. I., Sayfetdinova P. V. Structural and functional analysis and substantiation of the directions of development of the breeding and seed production system in Russia. *Mezhdunarodnyy sel'skokhozyaystvennyy zhurnal* = International Agricultural Journal. 2024;(1(397)):67–73. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=invwyn>
2. Lobachevskiy Ya. P., Lachuga Yu. F., Izmaylov A. Yu., Shogenov Yu. Kh. Scientific and technical achievements of agricultural engineering organizations in the context of digital transformation of agriculture. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela* = Machinery and Equipment for Rural Area. 2023;(4(310)):2–5. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/kigzdf>
3. Lobachevskiy Ya. P., Dorokhov A. S. Digital technologies and robotic devices in the agriculture. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2021;15(4):6–10. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10>
4. Izmaylov A. Yu., Evtyushenkov N. E., Rozhin V. F. Elaboration of mathematical device for modeling technologies for transportation of selective yield. *Vestnik Rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki* = Vestnik of the Russian agricultural science. 2015;(6):14–16. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/UOSUON>
5. Starostin I. A., Dmitriev K. S., Ovcharenko A. S., Ovchinnikov E. V. Universal platform concept for lifting operations. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*. 2024;(3(127)):54–60. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=69208745>

6. Chaplygin M. E., Godzhaev Z. A., Uyutov S. Yu. Engineered estimation of the parameters and operating modes of the electric drives of the threshing working bodies of the selection combine harvester. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of Voronezh state agrarian university. 2024;17(1(80)):112–124. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67314848>

7. Muzafarov E. R., Filkin N. M. Mathematical substantiation of the limit value of tangential traction force on driving wheels for transport-technological machines. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Mashinostroenie»* = Bulletin of South Ural State University, Series «Mechanical engineering industry». 2023;(4):32–40. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.14529/engin230403>

8. Aksenov A. G., Ovcharenko A. S., Dmitriev K. S., Kondrakhov D. D., Volkov A. O. Tsifrovoy dvoynik shassi gruzovogo elektro-transportnogo sredstva sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* = Proceedings of Nizhnevolzhskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education. 2024;(3(75)):309–320. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68635257>

9. Dubrovskiy A. F., Alyukov A. S., Alyukov S. V., Prokopiev K. V. Comparative analysis of methods of approximation of the working characteristics of elastic element of suspension of the vehicle. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Mashinostroenie»* = Bulletin of South Ural State University, Series «Mechanical engineering industry». 2017;(4):5–12. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.14529/engin170401>

10. Kuz'min V. A., Fedotkin R. S., Kryuchkov V. A. Development of the imitation model for estimation of efficiency of vibration protection of the system of seduction of wheeled agricultural tractor of class 4. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2018;(2(27)):340–347. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35685686>

11. Kuz'min V. A., Fedotkin R. S., Kryuchkov V. A. Artificial neural network applying for justification of tractors undercarriages parameters. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2017;(4):24–30. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29898802>

12. Volskaya N. S., Chichekin I. V. Corrections of calculations on ride comfort of wheeled vehicles based on their dynamic models. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2013;1(2(16)):241–248. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21283363>

13. Yukhin I. A., Uspenskiy I. A. Mathematical model of motion of an universal vehicle across the field. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* = Scientific Journal of KubSAU. 2013;(92):381–387. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20799886>

14. Plakhov S. A., Ponomarev A. I., Sidorov M. V. The use of modeling to evaluate the coupling properties of a universal wheel mover. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2024;(8):535–540. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=73162468>

15. Dmitrieva T. D., Kotkov A. S., Vasiliev A. A., Sidorov M. V., Ponomarev A. I. Investigation of the interaction of the wheel with the support base. *Inzhenernyy vestnik Dona* = Engineering Journal of Don. 2023;(1(97)):214–222. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50406335>

16. Adylin I. P., Malashenko Yu. A. Vibrations of agricultural machinery. *Vestnik Bryanskoy GSKhA* = Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2021;(3(85)):51–55. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.52691/2500-2651-2021-85-3-51-55>

Сведения об авторах

✉ **Старостин Иван Александрович**, кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией «Прогнозирование развития систем машин и технологий в АПК», ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», д. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107>, e-mail: starwan@yandex.ru

Овчаренко Александр Сергеевич, младший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», д. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1407-6757>

Дмитриев Кирилл Сергеевич, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», д. 5, 1-й Институтский проезд, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0075-610X>

Information about the authors

✉ **Ivan A. Starostin**, PhD in Engineering, leading researcher, Head of the Laboratory for Forecasting the Development of Machine Systems and Technologies in the Agro-Industrial Complex, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8890-1107>, e-mail: starwan@yandex.ru

Alexander S. Ovcharenko, junior researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1407-6757>

Kirill S. Dmitriev, PhD in Engineering, senior researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0075-610X>

✉ – Для контактов / Corresponding author

Обоснование параметров конструкции и режимов работы устройства для обмолота семян зернобобовых культур

© 2025. З. А. Годжаев¹, А. В. Колесников²✉

¹ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Российская Федерация,

²ФГБОУ ВО «Луганский государственный аграрный университет имени К. Е. Ворошилова», г. Луганск, Российская Федерация

В современном сельском хозяйстве оптимизация обмолота семян зернобобовых культур становится все более актуальной темой. Вопрос заключается в том, как улучшить процесс обмолота, чтобы повысить урожайность и улучшить качество семян. Зернобобовые культуры, такие как горох и соя, играют важную роль, так как они не только обеспечивают продовольственную безопасность, но и улучшают структуру почвы благодаря своей способности накапливать азот. Оптимизация обмолота подразумевает под собой использование современных технологий и методов, которые позволяют максимально эффективно извлекать семена из бобов. Это включает в себя выбор сроков обмолота, использование специализированной техники и соблюдение технологий, которые минимизируют потери семян. В данной работе приводится обоснование параметров конструкции молотильно-сепарирующего устройства дифференцированного обмолота зернобобовых культур, а также определены некоторые рациональные режимы работы аксиального ротора при выделении семян гороха и сои, удовлетворяющие агротехническим требованиям. По результатам проведения теоретических и экспериментальных исследований с использованием принципа обращенного движения, определены рациональные соотношения частот вращения ротора и его планетарных вальцов молотильно-сепарирующего устройства, соответствующих оптимальной скорости обмолота семян с наименьшими повреждениями, для гороха в интервале 13,1...20,0 м/с, для сои – 13,5...21,5 м/с. Применение предлагаемого устройства позволяет осуществлять дифференцированный обмолот и сепарацию семян зернобобовых культур (гороха и сои), обеспечив снижение дробления до 0,68 % при обмолоте гороха и 1,29 % – сои, при одновременном снижении травмирования семян соответственно, то есть обмолот семян, обладающих повышенными посевными и урожайными качествами. Улучшение качественных показателей выделяемых семян при обмолоте также сопровождается снижением удельной энергоемкости технологического процесса, равной соответственно 4,86 и 6,09 кДж/кг для гороха и сои.

Ключевые слова: зернобобовые, молотильный барабан, подбарабанье, скорость, валец, дифференцированный обмолот

Благодарности: работа выполнена при поддержке ФГБОУ ВО «Луганский государственный аграрный университет имени К. Е. Ворошилова» (№ 082-00137-24-02 от "19" апреля 2024 г.).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Годжаев З. А., Колесников А. В. Обоснование параметров конструкции и режимов работы устройства для обмолота семян зернобобовых культур. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(4):929–936.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.929-936>

Поступила: 04.04.2025

Принята к публикации: 08.08.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

Justification of design parameters and operating modes of a device for threshing seeds of grain legumes

© 2025. Zachid A. Godzhaev¹, Aleksey V. Kolesnikov²✉

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation,

²Luhansk Voroshilov State Agricultural University, Luhansk, Russian Federation

In modern agriculture, optimization of threshing of leguminous crop seeds is becoming an increasingly important topic. The question is how to improve the threshing process to increase yields and improve seed quality. Legumes such as peas and soybeans play an important role, as they not only provide food security, but also improve soil structure due to their ability to accumulate nitrogen. Optimization of threshing implies the use of modern technologies and methods that allow for the most efficient extraction of seeds from beans. This includes the selection of threshing times, the use of specialized equipment and compliance with technologies that minimize seed losses. This paper provides a rationale for the design parameters of a threshing and separating device for differentiated threshing of leguminous crops and also defines some rational operating modes of the axial rotor when separating pea and soybean seeds that meet agrotechnical requirements. Based on the results of theoretical and experimental studies using the principle of reverse motion, rational ratios of the rotation frequencies of the rotor and its planetary rollers of the threshing and separating device have been determined, which corresponds to the optimal speed of threshing seeds with the least damage, in the range of 13.1...20.0 m/s for peas, 13.5...21.5 m/s for soybeans. The use of the proposed device allows for differentiated threshing and separation of leguminous crop seeds (peas and soybeans), ensuring a reduction in crushing to 0.68 % when threshing peas and 1.29% when threshing soybeans, with a simultaneous reduction in

seed damage, respectively, that is, threshing seeds with increased sowing and yield qualities. The improvement of the quality indicators of the seeds released during threshing is also accompanied by a decrease in the specific energy intensity of the technological process, equal to 4.86 and 6.09 kJ/kg for peas and soybeans, respectively.

Keywords: grain legumes, threshing drum, concave, speed, roller, differentiated threshing

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Luhansk Voroshilov State Agricultural University (No. 082-00137-24-02 dated April 19, 2024).

The authors thank the reviewers for their contribution to the expert assessment of this work.

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

For citations: Godzhaev Z. A., Kolesnikov A. V. Justification of design parameters and operating modes of a device for threshing seeds of grain legumes. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):929–936. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.929-936>

Received: 04.04.2025 Accepted for publication: 08.08.2025 Published online: 29.08.2025

Зернобобовые культуры играют ключевую роль как поставщик растительного протеина для рациона животных и человека. Являются источником кормов с высоким содержанием белка, который жизненно важен для поддержания всех биохимических процессов в организме животных и обеспечения их высокой производительности. В общей доле растительных белковых ресурсов однолетние зернобобовые культуры занимают первостепенное место, основными из них являются горох и соя, которые в силу своих биологических особенностей могут возделываться во многих регионах и превышают по урожайности другие зернобобовые культуры при условии соблюдения агротехники их возделывания [1, 2, 3].

Уборка зернобобовых культур может выполняться обычными комбайнами или специальными для гороха и сои. Уборка сои ввиду большой жесткости и толщины стеблей в сравнении с горохом, а также ввиду большой массы, поступающей в барабан, обычно производится с уменьшением величины подачи растений на обмолот и уменьшением оборотов барабана [4]. В качестве априорных сведений этим требованиям более полно удовлетворяют молотильно-сепарирующие устройства, осуществляющие дифференцированный обмолот, конструкция которых изучена недостаточно и позволяет сохранять неизменной абсолютную скорость обмолачивающих элементов или заданный интервал этой скорости в зависимости от параметров конструкции и режимов работы рабочих органов, угла наклона (бичей, гребенок, лопаток, граней клиновидных зубьев и т.п.), выбранных в зависимости от физико-механических свойств обмолачиваемого материала – легкообмолачиваемого гороха и труднообмолачиваемой сои.

Для обеспечения полного вымолота семян, наименьшего их дробления и микротравмирования необходимо регулировать частоту вращения барабана и зазоры в моло-

тильном аппарате серийных зерноуборочных комбайнов по мере изменения влажности и величины подачи растительной массы не менее трех раз в день. Грамотное и выполненное в срок применение агротехнических мероприятий, учитывающее специфику зернобобовых растений, дает возможность аграриям и фермерам добиваться стабильных и значительных урожаев [5, 6] с учетом зональных условий и особенностей их возделывания.

Цель исследований – определить рациональное соотношение частот вращения ротора и планетарных вальцов молотильно-сепарирующего устройства дифференцированного типа при обмолоте гороха и сои.

Научная новизна – определены рекомендуемые режимы работы рабочих элементов молотильно-сепарирующего устройства, осуществляющего дифференцированный обмолот основных зернобобовых культур (гороха и сои) в условиях степной климатической зоны.

Материал и методы. Разработанная систематизация способов и оборудования для обмолота зернобобовых культур [7] позволила установить наиболее целесообразный тип устройства для получения продукции целевого назначения, в котором доминирует перетирающее воздействие в сочетании с ударным. Отмечена эффективность применения аксиально-роторной молотилки с бичами в сочетании с упруго-демпфирующими рабочими органами и решетчатым коническим подбарабаньем, имеющим переменное «живое» сечение проходových отверстий по длине.

Данные о процессе обмолота сельскохозяйственных культур, а также успешный опыт многолетних исследований авторов [8, 9, 10, 11, 12] указывают на перспективность аксиальных молотильно-сепарирующих устройств (МСУ) в плане повышения производительности и качества технологического процесса. Тем не менее,

их широкое внедрение ограничено высокой энергозатратностью обмолота. По выводу В. П. Горячкина [13, стр. 133], «...наиболее выгодным является тип барабана МСУ, который должен располагать, возможно, малым моментом инерции I , обеспечивающим оптимальное ускорение E , при возможно большей приведенной массе его, т. е.

$$M = \frac{I}{r_{cp}^2}, \quad (1)$$

где r_{cp} – значение радиуса аксиального ротора в среднем по его длине сечения, что соответствует барабану с малым диаметром».

Благодаря значительному моменту инерции ротора удастся нивелировать воздействие быстро меняющихся помех на молотильный аппарат. Эти помехи возникают из-за колебаний в объеме поступающего на обмолот материала, его характеристик и качества. Таким образом обеспечивается стабильность функционирования МСУ и создаются условия для более точного и дифференцированного с учетом реального более естественного состояния и свойств обмолачиваемого материала.

Процесс обмолота конусными аппаратами, с точки зрения математического описания, в принципе не отличается от обычной схемы. Молотильный барабан (ротор) обмолачивает семена под действием скользящего ударного воздействия в зоне обмолота, сил трения и центробежных сил, когда растительная масса проходит в молотильной камере между рабочими элементами вальцов ротора и подбарабаньем. При этом рифленый бич планетарного вальца сообщает вороху поступательное движение в то время, как под действием барабана растительная масса вращается и перемещается по спирали, обеспечивая своевременное выделение семян из зоны обмолота.

Экспериментальные исследования проводили с 2015 по 2025 год с использованием стандартного и специального оборудования. В ФГБОУ ВО «Луганский государственный аграрный университет имени К. Е. Ворошилова» на кафедре «Технический сервис в АПК» разработано экспериментальное МСУ планетарного типа с осевой подачей материала при обмолоте [14]. Схема устройства представлена на рисунке 1.

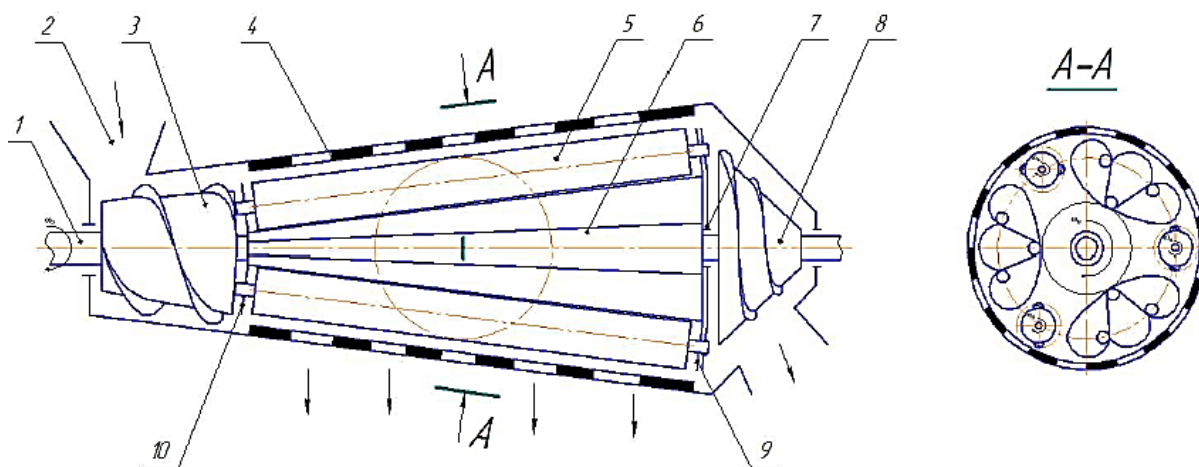


Рис. 1. Схема молотильно-сепарирующего устройства: 1 – опорно-приводной вал аксиального ротора; 2 – загрузочная воронка; 3 – шнек-питатель; 4 – коническое решетчатое подбарабанье; 5 – планетарный валец с бичами; 6 – упругодемпфирующий рабочий орган; 7 – планетарный привод; 8 – ворохоотводящий шнек; 9 и 10 – диски-водители с подшипниками /

Fig. 1. Scheme of the threshing and separating device: 1 – support and drive shaft of the axial rotor; 2 – loading hopper; 3 – auger feeder; 4 – conical lattice concave; 5 – planetary roller with flails; 6 – elastic-damping working element; 7 – planetary drive; 8 – waste-removal auger; 9 and 10 – disc carriers with bearings

Молотильный барабан представляет собой опорно-приводной вал 1 с закрепленным на нем шнеком-питателем 3 и жестко закрепленными на нем двумя фасонными дисками 9 и 10 в промежутках, между которыми на подшипниках установлены с наклоном около 8° цилиндрические планетарные вальцы 5, с жестко

закрепленными на них диаметрально противоположно рифлеными бичами. В промежутках между вальцами и фасонными дисками по длине ротора закреплены упругодемпфирующие рабочие органы 6, выполненные в форме петель или лопаток. На выходе на валу 1 установлены планетарный привод 7 и ворохоотводящий

шnek 8. Барабан смонтирован в средней части конического прутково-планчатого решета подбарабана 4, к которому крепится загрузочная воронка 2 для обмолачиваемого материала.

Для обеспечения захватывающей способности и перемещения растительной массы в молотильном зазоре на планетарных вальцах закреплены серийные односторонние бичи

с углом наклона в направлении вращения $3...5^\circ$, профиль бичевой ребристый левый.

Результаты и их обсуждение. На рисунке 2 показаны направления скоростей зернобобовой массы и элементов ротора на входе в молотильную камеру при осевой подаче стеблей со стороны меньшего основания усеченного конуса молотильного аппарата.

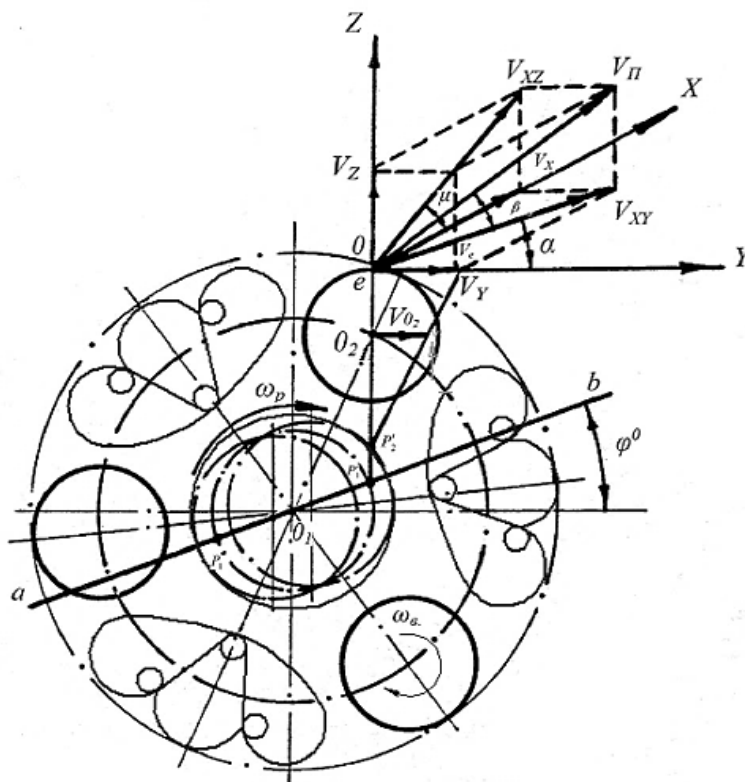


Рис. 2. Кинематическое обоснование молотильно-сепарирующего устройства /
Fig. 2. Kinetic justification of the threshing and separating device

Подача зернобобовой массы на обмолот осуществляется шнеком-питателем со скоростью V_{Π} под углом β к горизонтальной плоскости XOY , а проекция этой скорости V_{XY} на эту же плоскость составляет угол α с осью OY .

Тогда проекцию скорости подачи на ось OY можно представить зависимостью:

$$V_y = V_{\Pi} \cdot \cos\beta \cdot \cos\alpha, \quad (2)$$

а вероятность попадания бича по зернам на входе в молотильную камеру будет иметь вид:

$$P_n = 1 - \frac{V_{\Pi} \cos\beta \cdot \cos\alpha}{V_{ei}}, \quad (3)$$

где V_{ei} – скорость в точке «е» рифа бича планетарного вальца в сложном его движении, м/с.

Из уравнения (3) следует, что вероятность попадания максимальна в том случае, когда углы β и α равны 90° . Но в этом случае ротор не будет обладать захватывающей

способностью и эти условия не приемлемы с точки зрения снижения травмирования семян при обмолоте.

Направление оси OX совпадает с направлением вращения ротора. Оси OZ и OY расположены в плоскости вращения усеченного конуса малого диаметра планетарного ротора; X – координаты точки поступления бобовой массы по длине ротора при обмолоте; μ – угол наклона образующей конуса к оси вращения.

В зависимости от вида и состояния обмолачиваемой зернобобовой культуры принимаются различные сочетания направлений и значений скоростей вращения всего ротора и его валцов. Эти сочетания такие, чтобы стебли в рабочей щели перемещались к выходу со скоростью, достаточной для получения высокой производительности устройства и хорошего вымолота семян с более лучшим

качеством, учитывая условия степной климатической зоны.

Для определения кинематического режима аксиального ротора применим принцип обращенного движения [15], при котором при неподвижном решетчатом подбарабанье ротор и его вальцы вращаются относительно соответствующих мгновенных центров P'_1 и P'_2 (рис. 2), причем для обмолота зернобобовых культур направления вращения приняты такими, как показано на рисунке, т. е. совпадают.

Примем, что $\theta_1, \theta_2, r_1, r_2, \omega_p, \omega_g$ – центры, радиусы окружности и угловые скорости вращения ротора и планетарных вальцов; φ – угол трения по стали материала, поступающего на обмолот, $\varphi = 20...40^\circ$ в зависимости от влажности; ω_{P1} и ω_{P2} – угловые скорости ротора и его вальцов относительно соответствующих мгновенных центров P'_1 и P'_2 в обращенном движении; ρ_2 – расстояние между центром вальца θ_2 и мгновенным центром P'_2 его вращения в обращенном движении; V_{θ_2} – скорость центра вальца относительно поверхности решетчатого подбоя в обращенном движении; r_∂ – радиус подбарабанья в зоне обмолота, $r_\partial = r_1 + r_2 + \Delta_{cp.}$, где $\Delta_{cp.}$ – среднее значение молотильного зазора между ротором и подбарабаньем.

Переменное значение скорости обмолота по длине аксиального ротора определяется зависимостью:

$$V_{ei} = (\rho_2 + r_2 + x \cdot tg\mu) \cdot \omega_{P2}, \quad (4)$$

где x – координата точки поступления зернобобовой массы при ее перемещении в молотильном зазоре вдоль ротора.

Рациональное соотношение угловых скоростей ротора ω_p и его вальцов ω_g для среднего сечения конического аксиального ротора, обеспечивающее осевое перемещение зернобобовой массы в молотильном зазоре, определяется уравнением:

$$V_{e.cp.} = \sqrt{(r_1 \cdot \omega_p)^2 + V_n^2 - 2 \cdot r_1 \cdot \omega_p \cdot V_n \cdot \sin\beta} + (\omega_p + \omega_g) \cdot r_2, \quad (5)$$

где $V_{e.cp.}$ – скорость точки «е» бича планетарного вальца в среднем сечении, что соответствует рекомендуемой скорости выделения семян с наименьшими повреждениями, м/с; V_n – начальная скорость зернобобовой массы, м/с; β – угол, обусловленный захватом и направлением движения обмолачиваемой массы, град. ω_p – угловая скорость вальцов в обращенном движении, c^{-1} .

Угловая скорость планетарных вальцов в обращенном движении определяется выражением:

$$\omega_{P2} = \sqrt{\omega_p^2 + \omega_g^2 - 2\omega_p^2 - 2\omega_g^2 \cdot \cos\mu}, \quad (6)$$

где ω_p и ω_g – соответственно угловые скорости ротора и вальцов, c^{-1} .

Интервалы изменения скорости обмолота V_e по длине ротора L_p для гороха и сои представлены на рисунке 3.

Начальная скорость движения растительной массы на входе в молотильную камеру определена расчетом в соответствии с конструктивными особенностями двухзаходного шнека-питателя с углом $\beta = 18...24^\circ$, проверена экспериментально и составляет:

$$V_n = (0,038 \dots 0,043) \cdot \omega_p, \text{ м/с.} \quad (7)$$

Подставив значения конструктивных параметров изготовленной модели молотильно-сепарирующего устройства, а именно, радиус ротора в среднем сечении – $r_1 = 0,235$ м, радиус вальца по концам рифов бичей – $r_2 = 0,068$ м, показатели начальной скорости для гороха и сои в уравнение (7), при угле трения $\varphi = 20...40^\circ$, в зависимости от влажности, количество вальцов равно – 3 при длине ротора – 0,800 м и длине подбарабанья 0,816 м с углом охвата 360° и площадью сепарации 1,26 м², величины зазора на входе 24 мм в зону обмолота и выходе из нее – 6 мм в уравнение (5) и, выполнив соответствующие преобразования, получим его в следующем виде:

При обмолоте гороха $V_{e.cp.} = 16,1$ м/с, рекомендуемое соотношение угловых скоростей вращения аксиального ротора ω_p и вальцов ω_g :

$$16,1 = 0,225\omega_p + 0,081\omega_g \text{ или} \quad (8)$$

$$\frac{\omega_p}{71} + \frac{\omega_g}{189} = 1, c^{-1}. \quad (9)$$

При обмолоте сои $V_{e.cp.} = 17,5$ м/с, рекомендуемое соотношение угловых скоростей вращения аксиального ротора ω_p и вальцов ω_g :

$$17,5 = 0,228\omega_p + 0,088\omega_g \text{ или} \quad (10)$$

$$\frac{\omega_p}{78} + \frac{\omega_g}{206} = 1, c^{-1}. \quad (11)$$

Частота вращения ротора определяется зависимостью:

$$n_p = \frac{30\omega_p}{\pi}, \text{ мин}^{-1}. \quad (12)$$

Частота вращения вальцов определяется зависимостью:

$$n_g = \frac{30\omega_g}{\pi}, \text{ мин}^{-1}. \quad (13)$$

Средняя скорость стеблей в молотильном зазоре под воздействием рифленых бичей для исследуемого молотильно-сепарирующего устройства составит:

$$(0,035 \dots 0,040) \cdot V_{ei}. \quad (14)$$

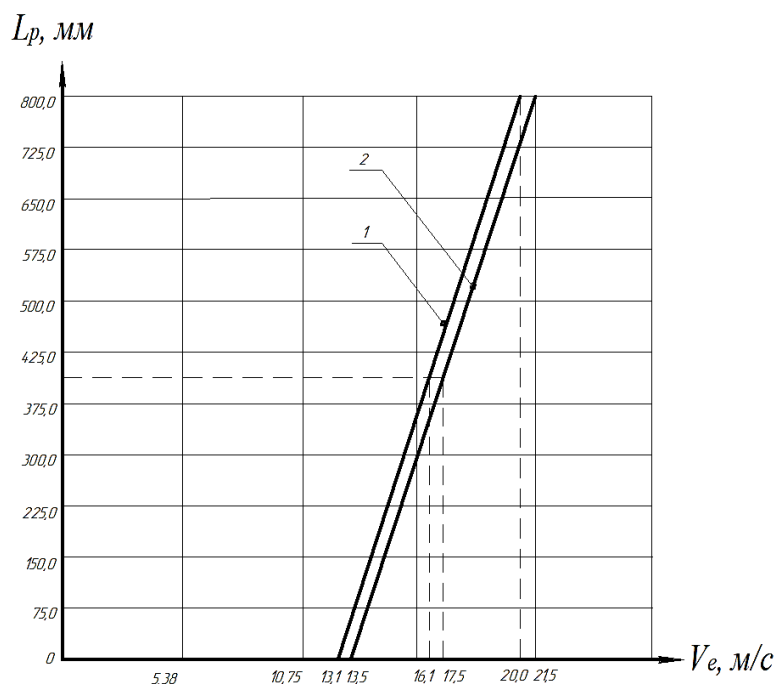


Рис. 3. Интервалы изменения скорости обмолота V_e по длине ротора L_p для гороха (1), для сои (2) /
Fig. 3. Intervals of change in threshing speed V_e along the rotor length L_p for peas (1), for soybeans (2)

Таким образом, нами определены рациональные рекомендуемые режимы работы рабочих элементов молотильно-сепарирующего устройства, осуществляющего дифференцированный обмолот гороха и сои, с количеством планетарных валцов – не менее трех, с диаметрально-расположенными на них бичами. Рациональное соотношение скоростей вращения ротора и валцов позволяет определить режимы их вращения равные при оборотах ротора $n_p = 450 \text{ мин}^{-1}$, обороты валцов для гороха $n_v = 610 \text{ мин}^{-1}$, для сои – $n_v = 780 \text{ мин}^{-1}$. Что соответствует дифференцированному изменению скорости обмолота для гороха в интервале 13,1...20,0 м/с, для сои – 13,5...21,5 м/с, производительность – до 3,2 кг/с; недомолот – 1,09 % при обмолоте гороха и 1,26 % при обмолоте сои; дробление семян 0,68 % при обмолоте гороха и 1,29 % при обмолоте сои, качество работы соответствует агротехническим требованиям при минимальной энергоёмкости процесса, равной соответственно 4,86 и 6,09 кДж/кг для гороха и сои [16].

Выводы. 1. На основании выполненного исследования намечено направление модернизации молотильных агрегатов с целью улучшения эффективности вымолачивания и отделения семян с учетом физико-механических характеристик, позволяющих расширить зону влияния использования принципа дифференцированного обмолота зернобобовых и других сельскохо-

зяйственных культур в направлении получения сельскохозяйственной продукции целевого назначения – семенное, продовольственное, фуражное и т. п.

2. Исследуемое молотильно-сепарирующее устройство обеспечивает переменный скоростной режим работы ротора, позволяет управлять процессом обмолота изменением интенсивности сепарации зерна, продолжительности и числа воздействий в зависимости от физико-механических свойств растений в перспективе путем активизации подбарабання, приданием ему колебательного или вращательного движения.

3. Полевая апробация исследуемого молотильно-сепарирующего устройства при сравнительных испытаниях показала высокое качество обмолоченных семян, отвечающего агротехническим требованиям на обмолот зернобобовых культур. При этом устройство менее чувствительно к неравномерности подачи.

4. Разработанная конструкция молотильно-сепарирующего устройства, а также предложенная методика инженерного расчета рациональных параметров обеспечивает дифференцированное изменение скорости обмолота для гороха в интервале 13,1...20,0 м/с, для сои – 13,5...21,5 м/с, производительность – до 3,2 кг/с; недомолот – 1,09 % при обмолоте гороха и 1,26 % при обмолоте сои; дробление семян 0,68 % при обмолоте гороха и 1,29 % – при обмолоте сои, качество работы соответствует агротехническим

требованиям при минимальной энергоемкости и сои. Результаты теоретических исследований процесса равной 4,86 и 6,09 кДж/кг для гороха подтверждены экспериментально.

Список литературы

1. Зотиков В. И., Полухин А. А., Грядунова Д. Н. Развитие инновационных технологий в растениеводстве на основе селекционных достижений. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2023;(2(46)):5–9. DOI: <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2023-2-5-9> EDN: GGAMMB
2. Ушаков Д. А., Маслов Г. Г. Перспективная система механизации возделывания полевых культур. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2020;(158):54–67. DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-158-005> EDN RWZIWZ
3. Maslov G. G., Yudina E. M., Ushakov D. A., Samurganov G. E. Design and technological aspects of spiked cereal combine stripping. *E3s web of conferences*. Krasnodar, Russia: EDP Sciences, 2021. Vol. 285. P. 07001. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128507001>
4. Оробинский В. И., Ворохобин А. В., Корнев А. С., Головин А. Д., Бачурин И. Г., Пожидаев И. А. Влияние фракционного состава зернового вороха на уровень травмирования и посевные качества семян. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2021;14(3):12–17. DOI: https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2021_3_12 EDN: YCNSXI
5. Присяжная И. М., Присяжная С. П. Разработка технологии уборки сои комбайном двухфазного обмолота для получения семян в условиях Амурской области. *Вестник российской сельскохозяйственной науки*. 2023;(6):107–112. DOI: <https://doi.org/10.31857/2500-2082/2023/6/107-112> EDN: WRIURW
6. Присяжная И. М., Присяжная С. П. Исследование процесса обмолота, сепарации и механического повреждения зерна сои по длине молотилки комбайна двухфазного обмолота. *Агронаука*. 2023;1(4):78–88. DOI: <https://doi.org/10.24412/2949-2211-1-4-78-88> EDN: KZJYKW
7. Ермак В. П., Колесников А. В. Классификация способов обмолота и анализ конструкций молотилок зернобобовых культур. *Научный вестник Луганского национального аграрного университета. Серия: Технические науки*. 2012;(41):83–90.
8. Пляка В. И., Алдошин Н. В., Панов А. И., Сергеева Н. А. Совершенствование аксиально-роторных молотильно-сепарирующих устройств. *Агроинженерия*. 2022;24(4):16–21. DOI: <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-16-21> EDN: FZBOML
9. Гиевский А. М., Чернышов А. В., Маслов Д. Л., Мильгунов В. Ю. Обоснование режима работы молотильно-сепарирующего устройства комбайна при уборке сои. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2019;12(1(60)):50–56. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2019.1.50> EDN: HUNLJC
10. Гиевский А. М., Оробинский В. И., Чернышов А. В., Баскаков И. В., Дружинин Р. А. Обоснование выбора типа комбайна для уборки посевов сои на кормовые и семенные цели. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2022;15(1(72)):12–22. DOI: https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_12 EDN: HXVAOH
11. Чаплыгин М. Е., Жалнин Э. В. Комплексная оценка эффективности работы современных зерноуборочных комбайнов в условиях южного региона России. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024;18(2):47–54. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-2-47-54> EDN: SOKFZO
12. Жалнин Э. В., Чаплыгин М. Е. Совершенствование конструкции зерноуборочных комбайнов путем гармонизации их базовых технических параметров. *Инженерные технологии и системы*. 2023;33(3):403–416. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.403-416> EDN: HQCPHM
13. Мацелуро М. Е. Творческое применение академика В. П. Горячкина в научных исследованиях по механизации сельского хозяйства. Минск: Издательство Академии наук БССР, 1956. 208 с.
14. Чеботарев М. И., Колесников В. А., Колесников А. В. Молотильный барабан: пат. № 2774848 Российская Федерация. № 2021117594: заявл. 15.06.21; опубл. 23.06.2022. Бюл. № 18. 6 с. Режим доступа: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
15. Колесников В. А., Колесников А. В. Молотильно-сепарирующее устройство для обмолота зернобобовых культур. *Промышленность и сельское хозяйство*. 2024;(13(78)):29–32.
16. Ермак В. П., Колесников В. А., Колесников А. В. Обоснование оптимальных параметров молотильно-сепарирующего устройства дифференцированного обмолота зернобобовых культур. *Вестник Донского государственного аграрного университета*. 2016;(1-1):51–60. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25940950> EDN: VVRHWL

References

1. Zotikov V. I., Polukhin A. A., Gryadunova D. N. Development of innovative technologies in crop production based on breeding achievements. *Zernobobovye i krupyanye kul'tury* = Legumes and Groat Crops. 2023;(2(46)):5–9. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/2309-348X-2023-2-5-9>
2. Ushakov D. A., Maslov G. G. Perspective system for mechanization of field crops cultivation. *Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University. 2020;(158):54–67. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-158-005>
3. Maslov G. G., Yudina E. M., Ushakov D. A., Samurganov G. E. Design and technological aspects of spiked cereal combine stripping. *E3s web of conferences*. Krasnodar, Russia: EDP Sciences, 2021. Vol. 285. P. 07001. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128507001>

4. Orobinskiy V. I., Vorokhobin A. V., Kornev A. S., Golovin A. D., Bachurin I. G., Pozhidaev I. A. Fraction composition of the grain heap and its influence on the level of grain damage and sowing qualities of seeds. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of Voronezh state agrarian university. 2021;14(3):12–17. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2021_3_12
5. Prisyazhnaya I. M., Prisyazhnaya S. P. Development of technology for harvesting soybeans using a two-phase threshing combine to obtain seeds in the conditions of the Amur region. *Vestnik Rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki* = Vestnik of the Russian agricultural science. 2023;(6):107–112. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/2500-2082/2023/6/107-112>
6. Prisyazhnaya I. M., Prisyazhnaya S. P. Research of the process of threshing, separation and mechanical damage of soybean grain along the length of the threshing machine of a two-phase threshing combine. *Agronauka*. 2023;1(4):78–88. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/2949-2211-1-4-78-88>
7. Ermak V. P., Kolesnikov A. V. Classification of threshing methods and analysis of designs of threshing machines for leguminous crops. *Nauchnyy vestnik Luganskogo natsional'nogo agrarnogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* = Scientific Bulletin of the State Educational Institution of the LPR "Luhansk National Agrarian University. Technical Sciences. 2012;(41):83–90. (In Russ.).
8. Plyaka V. I., Aldoshin N. V., Panov A. I., Sergeeva N. A. Improving axial-flow threshing-and-separating units. *Agroinzheneriya* = Agricultural Engineering (Moscow). 2022;24(4):16–21. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-4-16-21>
9. Gievskiy A. M., Chernyshov A. V., Maslov D. L., Milgunov V. Yu. Provision of a rationale for the mode of operation of the threshing and separating device of the combine at soybean harvesting. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of Voronezh state agrarian university. 2019;12(1(60)):50–56. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2019.1.50>
10. Gievskiy A. M., Orobinskiy V. I., Chernyshov A. V., Baskakov I. V., Druzhinin R. A. Rationale for choosing combine harvester type for harvesting soybean crops for feed and seed purposes. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of Voronezh state agrarian university. 2022;15(1(72)):12–22. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2022_1_12
11. Chaplygin M. E., Zhalnin E. V. Comprehensive evaluation of modern combine harvester performance in Southern Russia. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2024;18(2):47–54. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-2-47-54>
12. Zhalnin E. V., Chaplygin M. E. Improving the design of combine harvesters by harmonizing their basic technical parameters. *Inzhenernye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2023;33(3):403–416. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202303.403-416>
13. Matsepuro M. E. The creative application of academician V. P. Goryachkin in scientific research on agricultural mechanization. Minsk: *Izdatel'stvo Akademii nauk BSSR*, 1956. 208 p.
14. Chebotarev M. I., Kolesnikov V. A., Kolesnikov A. V. Threshing drum: Patent RF, no. 2774848, 2022. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
15. Kolesnikov V. A., Kolesnikov A. V. Threshing and separating device for threshing leguminous crops. *Promyshlennost' i sel'skoe khozyaystvo* = Industry and Agriculture. 2024;(13(78)):29–32. (In Russ.).
16. Ermak V. P., Kolesnikov V. A., Kolesnikov A. V. Substantiation of optimum parameters of the threshing-separating device for differentiated threshing legumes. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of Don State Agrarian University. 2016;(1-1):51–60. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25940950>

Сведения об авторах

Годжаев Захид Адыгезалович, доктор техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, дом 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1665-3730>

✉ **Колесников Алексей Владимирович**, старший преподаватель, ФГБОУ ВО «Луганский государственный аграрный университет имени К. Е. Ворошилова», д. 1, тер. ЛНАУ, р-н Артёмовский, г. о. Луганский, г. Луганск, Луганская Народная Республика, Российская Федерация, 291008, e-mail: rector@lnau.su, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2492-3307>, e-mail: xaxvxx@gmail.com

Information about the authors

Zakhid A. Godzhaev, DSc in Engineering, professor, corresponding member of RAS, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutskiy proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1665-3730>

✉ **Aleksey V. Kolesnikov**, senior lecturer, Luhansk Voroshilov State Agricultural University, ter. LNAU, Building 1, Lugansk, LPR, Russian Federation, 291008, e-mail: rector@lnau.su, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2492-3307>, e-mail: xaxvxx@gmail.com

✉ – Для контактов / Corresponding author

ПАМЯТИ УЧЕНОГО
ПАВЕЛ НИКОЛАЕВИЧ СИСЯГИН



21 июля 2025 года ушел из жизни Павел Николаевич Сисягин – человек великой души, доктор ветеринарных наук, профессор, заслуженный изобретатель Российской Федерации, член-корреспондент РАН.

Павел Николаевич Сисягин родился в 1947 году в д. Костино Ивановской области. С отличием окончил сначала Юрьевецкий зооветтехникум, затем – Ивановский сельскохозяйственный институт (ветеринарный факультет). Трудовую деятельность начал с 1971 года в должности главного ветеринарного врача Вичугской районной станции по борьбе с болезнями с.-х. животных Ивановской области. Уже в 1972 году Павел Николаевич поступил в очную аспирантуру Всесоюзного научно-исследовательского ящурного института МСХ СССР, в 1976 году успешно защитил кандидатскую диссертацию «Разработка полупроизводственного метода концентрирования суспензии вируса ящура». С 1978 года деятельность П. Н. Сисягина неразрывно связана с Научно-исследовательским ветеринарным институтом Нечерноземной зоны РФ (НИВИ НЗ РФ, г. Нижний Новгород), где он работал сначала в должности старшего научного сотрудника, с 1979 года — заместителя директора института по НИР, в период с 1993 по 2015 год – директора института.

В НИВИ НЗ РФ научно-исследовательская работа П. Н. Сисягина была направлена на решение проблемы массовых желудочно-кишечных и респираторных болезней молодняка с.-х. животных. Его исследования внесли весомый вклад в расшифровку вопросов эпизоотологии, этиологии и патогенеза этих болезней, совершенствование мер профилактики и борьбы, которые в настоящее время успешно применяются во многих регионах Российской Федерации и странах СНГ. Приоритетные разработки – способы профилактики и лечения желудочно-кишечных и респираторных болезней телят на основе коррекции иммунодефицитов, которые в совокупности позволили теоретически обосновать новое направление, включающее оптимизацию иммуногенеза, повышение резистентности организма и иммунизирующей активности вакцин против рота- и коронавирусной инфекций, парагриппа-3, инфекционного ринотрахеита, вирусной диареи и аденовирусной инфекции с применением иммунокорректирующих и адаптогенных средств – кватерина, квациклина, изокватерина, зоолана и других, широко апробированных и рекомендованных в установленном порядке для ветеринарной практики. П. Н. Сисягин – автор более 400 научных работ и 130 авторских свидетельств и патентов на изобретения. По результатам научных исследований П. Н. Сисягин в 1990 году защитил докторскую диссертацию «Болезни новорожденных телят в условиях лесостепной зоны РСФСР», в 2000 году ему присвоено звание профессора; в 2001 году избран членом-корреспондентом Россельхозакадемии, 2014 году – членом-корреспондентом РАН.

Павел Николаевич успешно сочетал научную деятельность с административной, основанной на принципах нравственной и правовой культуры. Высокий профессионализм и целеустремленность, ответственность и принципиальность, бережное и уважительное

отношение к людям позволили Павлу Николаевичу в непростое для науки время сохранять стабильность и работоспособность коллектива НИВИ НЗ РФ.

П. Н. Сисягин вел активную научно-педагогическую работу, осуществлял научное руководство подготовкой кандидатских и докторских диссертаций. В течение ряда лет являлся членом диссертационных советов при Санкт-Петербургской академии ветеринарной медицины, Ивановской ГСХА, Нижегородской ГСХА; членом Ветеринарного фармакологического совета, экспертного совета ВАК России, НТС при МСХ и продовольственных ресурсов Нижегородской области, бюро Отделения ветеринарной медицины Россельхозакадемии и Президиума Северо-Восточного научно-методического центра Россельхозакадемии.

Особо хочется отметить вклад Павла Николаевича в деятельность Северо-Восточного

научно-методического центра Россельхозакадемии (г. Киров), в состав которого НИВИ НЗ РФ вошел в 1996 году в качестве ассоциированного члена. Павел Николаевич, будучи опытным руководителем и авторитетным ученым в области ветеринарной медицины, оказывал всяческую поддержку научно-методической и организационной деятельности центра, обладал безусловным авторитетом среди ученых и директоров научных учреждений региона, всегда помогал найти оптимальный вариант решения в сложных ситуациях. Весомый вклад внес Павел Николаевич, как член редакционного совета, и в развитие научного журнала «Аграрная наука Евро-Северо-Востока».

Павел Николаевич вошел в нашу жизнь интеллигентным мужественным человеком исключительной скромности и доброй души, высокопрофессиональным ученым-руководителем, наставником, соратником, другом.

Светлая память Павлу Николаевичу Сисягину.

