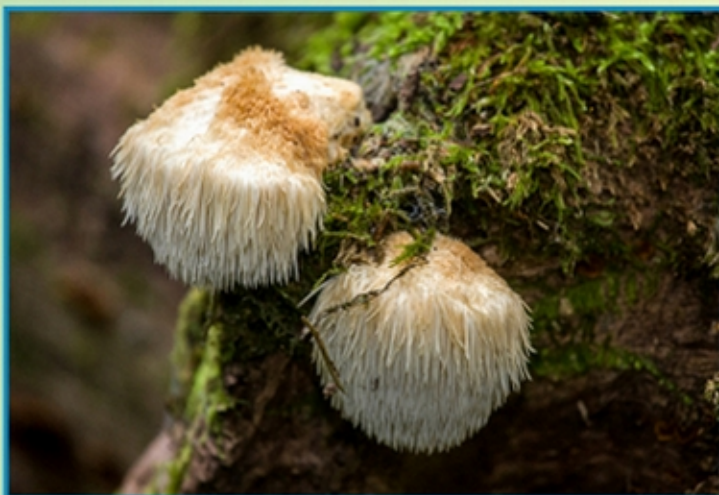
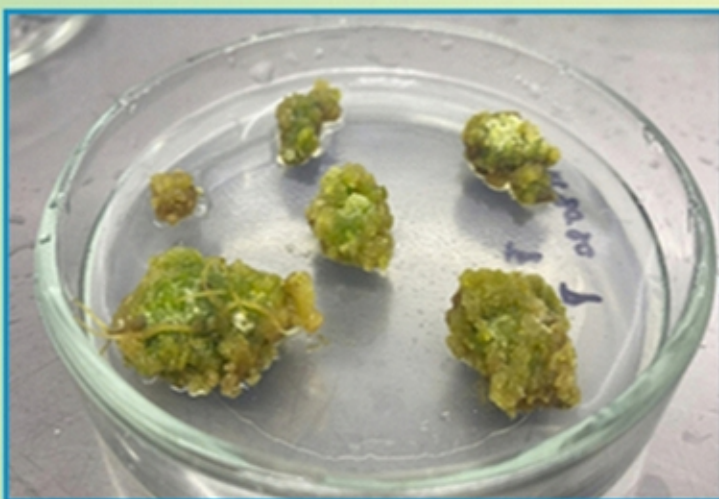


Аграрная наука Евро-Северо-Востока

AGRICULTURAL SCIENCE EURO-NORTH-EAST

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



Том 26
№ 1
2025

Vol. 26
No. 1
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 – Сысуйев 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,
Агалакова Татьяна Владимировна – к.б.н., старший научный сотрудник лаборатории ветеринарной иммунологии, 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

На первой странице обложки
третье фото сверху и
на 4-й странице обложки
фото А. Широких

Подписано к печати
25.02.2025

Дата выхода в свет
05.03.2025

Формат 60x84^{1/8}.

Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 25,11.

Тираж 100 экз. Заказ 5.

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 Евгения
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),
иностраный 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 Цилинского аграрного университета,
иностраный 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,

Tatyana V. Agalakova, Cand. of Sci. (Biology), senior researcher at the laboratory veterinary immunology, 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-ru.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

On the first page of the cover:
third photos from above and on the
4th page of the cover photo
A. Shirokikh

Passed for printing
25.02.2025

Date of publication
05.03.2025

Format 60x84^{1/8}. Offset paper.
Cond. pecs. 1. 25.11.

Circulation 100 copies. Order 5.
Free price.

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

- Ivan V. Savchenko** Dr. of Sci. (Biology), the professor, academician of RAS, chief researcher All-Russian Scientific Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants, Moscow, Russia
- Alexander G. Samodelkin** Dr. of Sci. (Biology), professor, Head of the agricultural and Environmental direction of the Nizhny Novgorod Scientific and Educational Center, Nizhny Novgorod, Russia
- Pavel N. Sisayagin** Dr. of Sci. (Veterinary), the professor, corresponding member of RAS, Nizhny Novgorod State Agrotechnological University, Nizhny Novgorod, Russia
- Vera I. Titova** Dr. of Sci. (Agricultural), Honored Worker of Science of the Russian Federation, professor, Head of the Department of Agrochemistry and Agroecology of Nizhny Novgorod State Agrotechnological University, Nizhny Novgorod, Russia
- Anton N. Tokarev** Dr. of Sci. (Veterinary), associate professor, Head of the Department of Veterinary-Sanitary Inspection Saint-Petersburg State Academy of Veterinary Medicine, St. Petersburg, Russia
- Eroma P. Urban** Dr. of Sci. (Agricultural), professor, corresponding member of Belarus NAS, Deputy General Director for Research, Research and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Arable Farming, Zhodino, Republic of Belarus
- Irina G. Shirokikh** Dr. of Sci. (Biology), chief researcher, Head of the Laboratory of Biotechnology of Plants and Microorganisms of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Kirov, Russia
- Irina N. Shchennikova** Dr. of Sci. (Agricultural), associate professor, corresponding member of RAS, chief researcher, Head of the Laboratory of Selection and Primary Seed Breeding of Barley of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Kirov, Russia
- Changzhong Ren** President of the Baicheng Academy of Agricultural Sciences (China), a foreign member of RAS, Baicheng, China
- Semjons Ivanovs** Dr. of Sci. (Engineering), Latvia University of Life Sciences and Technologies, Jelgava, Latvia
- Andrzej Marczuk** Dr. of Sci. (Engineering), professor, dean, University of Life Sciences in Lublin, Lublin, Poland
- András Náhlik** The professor, rector, University of Sopron, Institute of Wildlife Management and Vertebrate Zoology, Sopron, Hungary
- Kaisa Poutanen** Dr. of Sci. (Engineering), Academy Professor, VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland
- Vaclav Romaniuk** Dr. of Sci. (Engineering), professor, Institute of Technology and Life Sciences, Falenty, Poland
- Li Yu** professor, chief scientific officer, Jilin Agricultural University, foreign member of RAS, member of the Chinese Academy of Sciences, Changchun, China

Editorial Board

- Aleksey V. Aleshkin** Dr. of Sci. (Engineering), professor, the Department of Mechanics and Engineering Drawing, Vyatka State University, Kirov, Russia
- Andrey A. Artemjev** Dr. of Sci. (Agricultural), associate professor, leading researcher, Director of Mordovia Agricultural Research Institute –Branch of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Saransk, Russia
- Anna S. Brandorf** Dr. of Sci. (Agricultural), leading researcher, head of the Laboratory of Beekeeping, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Kirov, Russia
- Alexander I. Burkov** Dr. of Sci. (Engineering), professor, chief researcher of the Laboratory of Grain- and Seed-Cleaning Machines, the Honored Inventor of the Russian Federation, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Kirov, Russia
- Tatyana L. Egoshina** Dr. of Sci. (Biology), professor, Head of the Department of Ecology and Resource Management, Professor Zhitkov Federal State Budgetary Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming, Kirov, Russia
- Alexander A. Ivanovsky** Dr. of Sci. (Veterinary), leading researcher, head of the Laboratory of Veterinary Biotechnology, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Kirov, Russia
- Olga V. Kostenko** Cand. of Sci. (Economics), associate professor, associate professor at the Department of Accounting and Finance, Vyatka State Agrotechnological University, Kirov, Russia
- 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

А. В. Харина, Н. В. Новоселова

Применение ДНК-маркеров в селекции пшеницы на устойчивость к пыльной головне (обзор)..... 7

В. С. Понамарёв, О. С. Попова, О. А. Украинская

Роль системы цитохромов в биотрансформации ксенобиотиков и лекарственных средств (обзор)..... 21

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

РАСТЕНИЕВОДСТВО

О. В. Левакова

Влияние регулятора роста растений Биосил на продуктивность ячменя ярового на темно-серой почве Центрального региона РФ..... 40

И. В. Лыскова, О. Э. Суховеева, С. С. Пислегина

Влияние изменений агроклиматических ресурсов на урожайность гороха в новом климатическом периоде 1991–2020 гг. в условиях Кировской области..... 48

В. И. Пахомов, А. В. Брагинцев, О. Н. Бахчевников, Д. А. Максак

Влияние предпосевной обработки семян электрофизическими и химическими воздействиями на урожайность зерна кукурузы..... 59

С. А. Гусева, О. С. Носко, О. С. Башинская, Д. Д. Бабушкин

Оценка влияния абиотических факторов внешней среды на формирование элементов структуры початка сортообразцов сахарной кукурузы в условиях Саратовской области..... 70

Д. Д. Тележинский, А. В. Шлявас

Морфобиологические особенности и агрономические достоинства нового сорта яблони Розочка..... 82

Е. Ю. Невоструева

Оценка исходных форм земляники на устойчивость к серой гнили в условиях Среднего Урала..... 90

ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ

Т. Ю. Гагжаева, А. С. Орина, О. П. Гаврилова, И. И. Трубин, А. В. Хютти

Распространение фузариозной сухой гнили клубней картофеля в Российской Федерации..... 98

Н. Б. Баранова, В. В. Костенко, М. Л. Пономарева

Характеристика сортового генофонда мягкой яровой пшеницы Республики Татарстан по генетическим маркерам устойчивости к желтой ржавчине..... 107

А. С. Бушнев, Г. И. Орехов, И. А. Котлярова, Д. А. Курилова, Ю. В. Мамырко

Эффективность технологических приемов возделывания материнской линии подсолнечника..... 115

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ МИКРОБИОЛОГИЯ И МИКОЛОГИЯ

В. Ю. Ступко, С. Ю. Луговцова, Н. А. Нешумаева

Влияние фильтрата культуральной жидкости *Fusarium sporotrichioides* на каллусную культуру пшеницы..... 129

КОРМОПРОИЗВОДСТВО: ПОЛЕВОЕ И ЛУГОВОЕ

С. А. Давыдова, А. И. Ряdney, А. О. Тишанинова, Т. В. Ананьева

Перспективы использования надземной биомассы тростника южного (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) в технологиях кормопроизводства..... 141

ЗООТЕХНИЯ

Л. И. Кузякина, Е. Н. Усманова, Е. А. Смирнов, Е. В. Мокерова

Частота распределения и связь полиморфизма молочных белков у голштинских быков с продуктивностью их матерей и оценкой по дочерям..... 150

Н. А. Худякова, И. С. Кожеевникова, А. О. Ступина, И. А. Классен, А. С. Кашин

Динамика живой массы коров холмогорской породы по полиморфизму гена лептина..... 158

С. Н. Гудков, Н. Н. Горб, О. А. Зайко, Л. П. Ермакова, А. Интханухак

Влияние теплового стресса на репродуктивные качества свиноматок крупной белой породы..... 166

ВЕТЕРИНАРНАЯ МЕДИЦИНА

Н. В. Мороз, Д. Л. Долгов, И. А. Чвала, С. В. Фролов, А. Д. Грехнева, В. Ю. Кулаков

Профилактика гриппа птиц H5N1: инактивированная вакцина на основе антигена низкопатогенного варианта вируса против высокопатогенного штамма..... 174

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ

С. Дорохов, А. В. Сибирёв, М. А. Мосяков, Н. В. Сазонов, А. В. Грищенко

Разработка роботизированного буртоукладчика с цифровой системой автоматизированного движения для закладки на хранение картофеля и овощных культур..... 184

А. А. Михайлин

Построение модели движения внутрипочвенной влаги в склоновых обрабатываемых землях..... 196

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

В. А. Сысцев

История вятской агроинженерной науки (к 130-летию ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока)..... 208

CONTENTS

REVIEWS

<i>Anastasia V. Kharina, Nina V. Novoselova</i> The use of DNA markers in wheat breeding for resistance to loose smut (review).....	7
<i>Vladimir S. Ponamarev, Olga S. Popova, Olga A. Ukrainskaya</i> The role of the cytochrome system in the biotransformation of xenobiotics and pharmacueticals (review).....	21

ORIGINAL SCIENTIFIC ARTICLES

PLANT GROWING

<i>Olga V. Levakova</i> The influence of the plant growth regulator Biosil on the productivity of spring barley on dark gray soil in the Central region of the Russian Federation.....	40
<i>Irina V. Lyskova, Olga E. Sukhoveeva, Svetlana S. Pislegina</i> The impact of changes in agro-climatic resources on pea yield in the new climatic period of 1991–2020 in the Kirov region.....	48
<i>Viktor I. Pakhomov, Andrey V. Braginets, Oleg N. Bakhchevnikov, Dmitriy A. Maksak</i> Effect of pre-sowing seed treatment by electrophysical and chemical exposures on maize grain yields.....	59
<i>Svetlana A. Guseva, Oksana S. Nosko, Oksana S. Bashinskaya, Denis D. Babushkin</i> Evaluation of the influence of abiotic environmental factors on the cob structure elements formation of sweet corn cultivar samples in the Saratov Region.....	70
<i>Dmitriy D. Telezhinskiy, Anna V. Shlyavas</i> Morphobiological features and agronomic advantages of the new apple cultivar ‘Rozochka’.....	82
<i>Elena Yu. Nevostrueva</i> Evaluation of original strawberry forms for resistance to gray mold in the conditions of the Middle Urals.....	90

PLANT PROTECTION

<i>Tatiana Yu. Gagkaeva, Aleksandra S. Orina, Olga P. Gavrilova, Ilya I. Trubin, Aleksandr V. Khiutti</i> Distribution of Fusarium dry rot of potato tubers in Russian Federation.....	98
<i>Natalia B. Baranova, Victoria V. Kostenko, Mira L. Ponomareva</i> Characteristics of the varietal gene pool of soft spring wheat in the Republic of Tatarstan according to genetic markers of resistance to stripe (yellow) rust.....	107
<i>Alexander S. Bushnev, Gennady I. Orekhov, Irina A. Kotlyarova, Dina A. Kurilova, Yulia V. Mamyрко</i> Efficiency of technological methods of cultivation of sunflower maternal line.....	115

AGRICULTURAL MICROBIOLOGY AND MYCOLOGY

<i>Valentina Yu. Stupko, Svetlana Yu. Lugovtsova, Nadezhda A. Neshumaeva</i> Effect of culture filtrates of <i>Fusarium sporotrichioides</i> on wheat callus culture.....	129
--	-----

FODDER PRODUCTION: FIELD AND MEADOW

<i>Svetlana A. Davydova, Aleksey I. Ryadnov, Anastasia O. Tishaninova, Tatiana V. Ananeva</i> Prospects for the use of the aboveground biomass of southern cane (<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex. Steud.) in feed production technologies.....	141
--	-----

ZOOTECHNY

<i>Ludmila I. Kuzyakina, Elena N. Usmanova, Egor A. Smirnov, Elena V. Mokerova</i> Frequency of distribution and relationship of polymorphism of milk proteins in Holstein bulls with the productivity of their mothers and assessment of daughters.....	150
<i>Natalya A. Khudyakova, Irina S. Kozhevnikova, Aleksandra O. Stupina, Inga A. Klassen, Andrej S. Kashin</i> Dynamics of the development of live weight in cows of the Kholmogory breed according to the polymorphism of the leptin gene.....	158
<i>Sergey N. Gudkov, Natalya N. Gorb, Olga A. Zajko, Ludmila P. Ermakova, Anton Intkhanukhak</i> Effect of thermal stress on the reproductive qualities of large white breed sows.....	166

VETERINARY MEDICINE

<i>Natalya V. Moroz, Dmitry L. Dolgov, Ilya A. Chvala, Sergey V. Frolov, Alyona D. Grekhneva, Vladimir Yu. Kulakov</i> The prevention of H5N1 avian influenza: inactivated low pathogenicity avian influenza virus-based vaccine against high pathogenicity avian influenza virus strain.....	174
--	-----

MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

<i>Aleksey S. Dorokhov, Aleksey V. Sibirev, Maksim A. Mosyakov, Nikolai V. Sazonov, Alexander V. Grishchenko</i> Development of a digital system for automated movement of a pick-up conveyor for storing potatoes and vegetable crops.....	184
<i>Andrey A. Mikhaylin</i> Construction of a model of subsoil moisture movement in cultivated slope lands.....	196

PAGES OF HISTORY

<i>Vasily A. Sysuev</i> The history of Vyatka agroengineering science (to the 130th anniversary of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky).....	208
--	-----

ОБЗОРЫ/REVIEWS

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.7-20>
УДК 633.111:632.485.12



Применение ДНК-маркеров в селекции пшеницы на устойчивость к пыльной головне (обзор)

© 2025. А. В. Харина✉, Н. В. Новоселова

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

Пшеница (Triticum aestivum L.) является важной и востребованной культурой во всем мире. Значительное снижение ее урожайности обусловлено поражением болезнями, одно из наиболее опасных заболеваний – пыльная головня (Ustilago tritici (Pers.) Rostr.). Самый эффективный, экономически выгодный и экологически оправданный способ борьбы с болезнью – создание устойчивых сортов с применением молекулярно-биологических методов. В работе проанализированы отечественные и зарубежные литературные источники за последние 10 лет. Приведены особенности биологии Ustilago tritici и его взаимодействия с растением-хозяином. Рассмотрены возможности и опыт использования различных ПЦР-маркеров как при диагностике и изучении возбудителя пыльной головни пшеницы, так и в маркер-вспомогательной селекции (MAS-селекции) устойчивых к болезни сортов. Показана значимость ПЦР как одного из наиболее распространенных современных, высокочувствительных, специфичных, быстрых и экономически доступных лабораторных методов детекции возбудителя заболевания, а также изучения его расового состава. Проанализирован перечень известных в настоящее время генов, сорто-доноров и ДНК-маркеров, сцепленных с генами и локусами устойчивости пшеницы к пыльной головне. Приведенные результаты исследований свидетельствуют о наличии достаточно большой базы данных для использования ПЦР-маркеров при создании устойчивых сортов пшеницы.

Ключевые слова: *Triticum aestivum L., сорт, Ustilago tritici (Pers.) Rostr., раса, гены устойчивости, ДНК-маркер*

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (тема №FNWE-2022-0001).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Харина А. В., Новоселова Н. В. Применение ДНК-маркеров в селекции пшеницы на устойчивость к пыльной головне (обзор). Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(1):7–20.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.7-20>

Поступила: 18.12.2024

Принята к публикации: 10.02.2025

Опубликована онлайн: 26.02.2025

The use of DNA markers in wheat breeding for resistance to loose smut (review)

© 2025. Anastasia V. Kharina✉, Nina V. Novoselova

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

Wheat (Triticum aestivum L.) is an important and popular crop all over the world. An economically significant decrease in its yield is due to disease infection the most harmful of which is the loose smut (Ustilago tritici (Pers.) Rostr.). The most effective, cost – effective and environmentally friendly way to fight the disease is to create resistant varieties using molecular biological methods. The research gives an analysis of domestic and foreign literary sources over the past 10 years. The features of the biology of Ustilago tritici and its interaction with the host plant are presented. The possibilities and experience of using various PCR markers are considered both in the diagnosis and study of the causative agent of wheat smut, and in marker-assisted breeding (MAS-breeding) of disease-resistant cultivars. The importance of PCR as one of the most widespread modern, highly sensitive, specific, fast and economically affordable laboratory methods for detecting the causative agent of the disease, as well as studying its racial composition, is shown. The list of currently known genes, donor cultivars and DNA markers linked to genes and loci of wheat resistance to dust smut is analyzed. The above research results indicate that there is a sufficiently large database for the use of PCR markers in the creation of resistant wheat cultivars.

Keywords: *Triticum aestivum L., cultivar, Ustilago tritici (Pers.) Rostr., race, resistance genes, DNA marker*

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky (topic No. FNWE-2022-0001).

The authors thank the reviewers for their contribution to the expert assessment of this work.

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

For citation: Kharina A. V., Novoselova N. V. The use of DNA markers in wheat breeding for resistance to loose smut (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):7–20. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.7-20>

Received: 18.12.2024

Accepted for publication: 10.02.2025

Published online: 26.02.2025

Производство зерна – это стратегическая отрасль народнохозяйственного комплекса нашей страны. По уровню производства зерна в России явно лидирует пшеница¹ [1]. Под посевами яровой и озимой пшеницы в 2023 году в стране было занято более 29 млн га². Данная культура очень важна и широко востребована по всему миру. Она используется как в пищевой промышленности (производство хлеба, макаронных изделий, круп и т. д.), так и для кормления сельскохозяйственных животных. Из зерна пшеницы также вырабатывают спирт и крахмал [1, 2].

Одной из главных причин снижения урожайности является биотический стресс [3, 4]. К наиболее вредоносным болезням пшеницы относится пыльная головня [5, 6, 7], возбудитель – *Ustilago tritici* (Pers.) Rostr., синоним *Ustilago segetum* var. *tritici* (Pers.) Brunaud – распространена в России повсеместно. Данная болезнь экономически значима. Потери урожая вследствие заболевания могут быть как умеренными (11–30 %), так и высокими (40–50 %) [6, 8, 9]. Ущерб, причиняемый *U. Tritici*, заключается не только в разрушении колоса. Действие патогена отмечается на каждом этапе развития растений пшеницы. Снижается всхожесть пораженных семян, уменьшаются такие элементы структуры урожая, как продуктивная кустистость, число зерен с колоса и масса 1000 зерен [6, 8, 10, 11].

В настоящее время с пыльной головней борются с помощью контроля качества посевного материала, применения фунгицидов и выведения устойчивых сортов [6, 12, 13]. Высокая стоимость фунгицидов ограничивает их использование. Следует заметить, что частое и необоснованное применение пестицидов представляет потенциальную опасность для окружающей среды и здоровья человека, а также может привести к появлению устойчивых к ним штаммов патогенов [5, 7, 8]. На данный момент есть информация о случаях появления резистентности различных видов грибов к почти

всем основным классам фунгицидов [14]. Исходя из этого, создание устойчивых сортов – один из самых эффективных и экономически выгодных способов борьбы с пыльной головней [6, 12, 15]. Это позволило бы предотвратить снижение урожайности, а также сократить использование химикатов.

Классическая селекция на устойчивость к грибным заболеваниям зачастую требует формирования и поддержания коллекции различных штаммов патогенов для создания искусственного инфекционного фона. Изучение устойчивости пшеницы к пыльной головне по фенотипу может занять целых два полевых сезона, если учесть, что во время первого сезона проводится инокуляция исследуемых растений, а в течение второго – учет проявившихся симптомов заболевания [16].

Применение молекулярно-биологических методов, дающих возможность отбирать нужные растения непосредственно по генотипу, делает селекцию на резистентность и толерантность к различным болезням более точной и быстрой, что повышает ее эффективность. Поэтому использование молекулярных маркеров в настоящее время становится неотъемлемой частью селекционного процесса. Маркеры, сцепленные с генами и локусами устойчивости, позволяют в короткие сроки провести скрининг большого количества образцов, что облегчает подбор исходного материала для селекции, а также отбор устойчивых генотипов на всех этапах селекционного процесса. ДНК-маркеры также упрощают задачу пирамидирования генов – важной селекционной стратегии, направленной на объединение нескольких генов устойчивости в генотипе одного сорта. [17, 18, 19]. Кроме того, ПЦР является быстрым и высокочувствительным методом идентификации возбудителей болезней, что также способствует определению устойчивых и восприимчивых линий и сортов, даже на ранних этапах развития растения [14].

¹Медведева А. Рейтинг 10 сортов лидеров сельскохозяйственных культур по объемам высева в РФ в 2022 году. Агро XXI (агропромышленный портал) 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.agroxxi.ru/analiz-rynka-selskohozaistvennyh-tovarov/reiting-10-sortov-liderov-selskohozaistvennyh-kultur-po-obemam-vyseva-v-rf-v-2022-godu.html> (дата обращения: 12.11.2024).

²Яровая пшеница. Посевные площади, валовые сборы и урожайность в 2023 году. Экспертно-аналитический центр агробизнеса "АБ-Центр". [Электронный ресурс]. URL: <https://ab-centre.ru/news/yarovaya-pshenica-posevnye-ploschadi-valovye-sbory-i-urozhaynost-v-2023-godu> (дата обращения: 20.11.2024).

Цель обзора – рассмотреть опыт и возможности использования различных ПЦР-маркеров как при диагностике и изучении возбудителя пыльной головки пшеницы, так и в маркер-вспомогательной селекции (MAS-селекции) устойчивых к болезни сортов.

Материал и методы. Изучено 56 научных публикаций отечественных и зарубежных авторов, опубликованных за последние 10 лет и посвященных исследованиям в области применения молекулярно-биологических методов в детекции возбудителя болезни и его расового состава, а также в маркер-вспомогательной селекции пшеницы на устойчивость к пыльной головке. Поиск научных статей осуществляли путем мониторинга электронных библиотечных систем: e-Library.ru, Springer, Cyberleninka, Research Gate.

Основная часть. Особенности биологии *Ustilago tritici* (Pers.) Rostr. и его взаимодействия с пшеницей. Представители царства грибов – основная причина заболеваний злаков, передающихся через семена [12]. *Ustilago tritici* (Pers.) Rostr. относится к отделу Базидиомицетов (*Basidiomycetes*) и является биотрофным грибом, т. е. его жизненный цикл тесно связан с растением-хозяином [20, 21]. Исследователями было отмечено, что у данного патогена имеются две формы: первая паразитирует на сортах мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.); вторая – на сортах твердой пшеницы (*T. durum* Desf.). Известны и переходные формы, способные поражать растения обоих видов [22].

Инфицирование пыльной головкой происходит во время цветения пшеницы, однако известны случаи успешного заражения растения и после завершения цветения, в начале стадии налива зерна. Телиоспоры переносятся с больных колосьев на здоровые с помощью ветра. При попадании спор на рыльце пестика происходит инфицирование новых растений. В течение суток телиоспоры прорастают и в результате мейоза образуют базидии. При слиянии гаплоидных базидий формируются гифы, которые проникают в каналы пестика и образуют мицелий. Далее мицелий захватывает все части зародыша и щитка.

Развитию пыльной головки пшеницы способствует холодная и влажная погода. Это происходит потому, что при достаточно высокой температуре воздуха и низкой влажности мицелий в пестике или семенной оболочке с высокой вероятностью засыхает и гибнет.

Кроме того, температура не выше 24 °C и высокая влажность затягивают цветение пшеницы, увеличивая период возможного заражения [10, 12].

В процессе колонизации растения паразит выделяет в ткани хозяина белки-эффекторы, которые влияют на метаболизм растения и подавляют его защитные реакции [14, 20]. Важно, что ни зараженные семена, ни выросшие из них растения до стадии колошения внешне не проявляют каких-либо заметных симптомов болезни [12, 23].

Мицелий зимует вместе с созревшим зерном. После прорастания зерна мицелий тоже начинает расти, колонизирует ткани растения и в итоге проникает в развивающийся колос, где грибок спорулирует и распространяет споры после выколашивания. При этом разрушаются все части колоса, кроме стержня, и образуется черная пылящая масса (рис.) [10, 12].

U. tritici не способен к бесполому размножению в дикариофазе. В ходе каждого прорастания телиоспор происходит слияние гаплоидных клеток разных половых групп, что приводит к рекомбинации признаков. Поэтому паразитный дикариофитный мицелий гриба постоянно гетерозиготен [12, 20, 24].

В целом, между *U. tritici* и пшеницей происходит бесконечная «гонка вооружений и обороны», которая описывается современной «зигзаг моделью» фитоиммунитета [25]. Базовая устойчивость растений к заражению активируется рецепторами плазматической мембраны клетки. Эффекторы, выделяемые патогеном, способны подавлять базовую устойчивость растений и создавать условия для развития заболевания. В то же время внутриклеточные рецепторы иммунного ответа могут реагировать уже на сам эффектор, что приводит к расспецифической устойчивости хозяина. Таким образом, растения эволюционируют в направлении предотвращения проникновения патогенов и подавления их развития в своих тканях. Что касается патогенных грибов, то их эволюция направлена на то, чтобы во что бы то ни стало начать и продолжить колонизацию организма-хозяина [20, 25, 26]. В этой постоянной борьбе задачами селекционера является, во-первых, сбор актуальной информации о наличии и расовом составе патогена, во-вторых, поиск и внедрение в схемы создания сортов исходного материала, разнообразного по типам устойчивости и генам, которые ее контролируют.

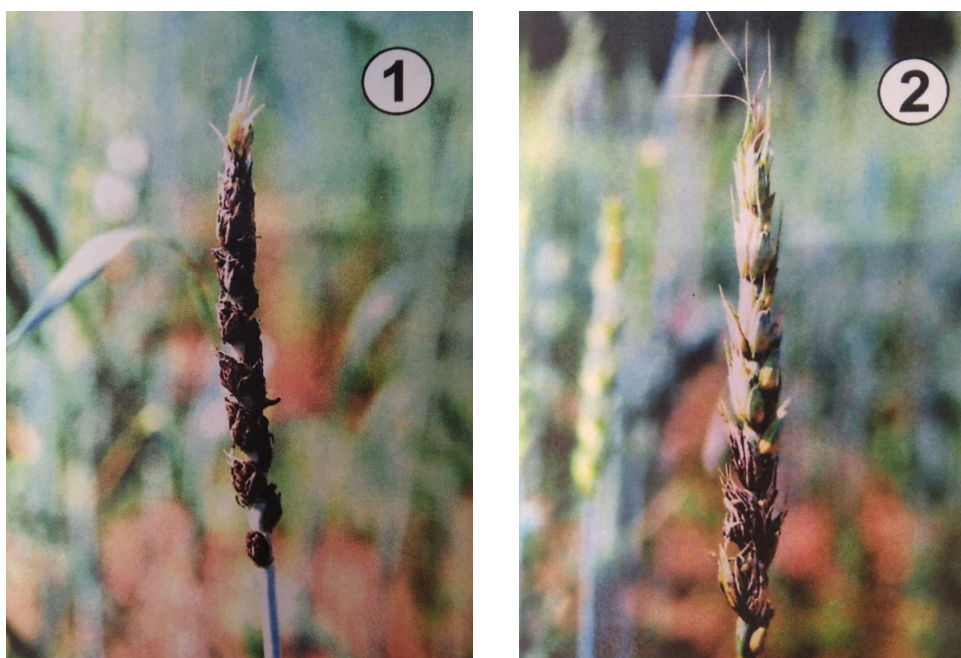


Рис. Колосья яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) с сильной (1) и средней (2) степенью поражения пыльной головней (*Ustilago tritici* (Pers.) Rostr.) /

Fig. Ears of spring soft wheat (*Triticum aestivum* L.) with a strong (1) and medium (2) degree of the loose smut (*Ustilago tritici* (Pers.) Rostr.) infection

ПЦР-маркеры для детекции заболевания: преимущества и возможности. Симптомы пыльной головни невозможно заметить на растениях пшеницы вплоть до фазы колошения. Методы быстрой идентификации возбудителей важны в селекции при отборе линий и сортов на устойчивость к болезням. Поэтому существует потребность в методе, который позволял бы вовремя диагностировать развитие патогена в тканях пшеницы для своевременной отбраковки растений [27]. Современный метод детекции возбудителей заболевания должен быть высокочувствительным, специфичным, быстрым и экономически доступным. ПЦР является одним из наиболее распространенных лабораторных методов выявления патогенов растений

во всем мире [28]. Высокая чувствительность ПЦР-анализа позволяет успешно применять его для идентификации возбудителей различных инфекционных заболеваний сельскохозяйственных растений [29, 30, 31].

Геномы головневых грибов имеют относительно небольшой размер (около 20 Mbp), например, в 4–6 раз меньше, чем у ржавчинных грибов [20, 26]. Данное условие упрощает молекулярно-генетические исследования представителей рода *Ustilago*.

Исследователи Д. А. Уиллитс, Дж. Э. Шервуд (D. A. Willits, J. E. Sherwood) опубликовали в 1999 году последовательности праймеров для идентификации различных головневых грибов [32] (табл. 1).

Таблица 1 – Праймеры для идентификации головневых грибов *Ustilago* spp. /
Table 1 – Primers for the identification of smut fungi *Ustilago* spp.

Маркер/ Marker	Последовательность / Sequence	Температурный режим, °C / Temperature regime, °C	Размер ампликона, п.н. / Amplicon size, bp
Uh1 [32]	CGCACCTGTCCAACATAAC	57	574
Uh4 [32]	GAGGTTGAGATGGGTAGGA	57	574
EF1atf [27]	ATGATTCCCAACCAAGCCCAT	83	454
EF1atr [27]	ACACCAACAGCCACAGTTTGC	83	454

Р. И. Омара с соавт. (R. I. Omara et. al.) успешно использовали один из этих маркеров

для обнаружения *U. tritici* в зараженном зерне пшеницы [33].

Ян Вундерле с коллегами (J. Wunderle et al.) применяли для детекции *U. tritici* метод количественной ПЦР-РВ (ПЦР в режиме реального времени). Результаты исследования показали, что детекция возбудителя возможна уже на стадии проростков [27]. Предел обнаружения составил 40 пг/мл ДНК патогена. Методика в равной степени подходила и яровым, и озимым сортам. Кроме того, количественная ПЦР позволяет следить за динамикой развития возбудителя в тканях растения. Авторы сообщают, что разработанная ими методика имеет высокий потенциал для селекции устойчивых к пыльной головне сортов. Х. Янь с соавт. (H. Yan et al.) также отмечали высокую специфичность и эффективность разработанной ими тест-системы для количественного ПЦР-РВ при детекции возбудителя пыльной головки пшеницы [5].

Идентификация расы возбудителя с помощью ДНК-маркеров. Генетическая изменчивость популяции патогена способна существенно снижать эффективность генов устойчивости к заболеванию. Как уже говорилось ранее, вследствие рекомбинаций и мутаций генов-эффекторов в каждом поколении *U. tritici* могут возникать новые вирулентные расы. Поэтому селекция на устойчивость к пыльной головне должна проводиться одновременно с мониторингом расового состава, который для каждого региона специфичен [15, 20, 34].

Физиологической расой гриба называют образец телиоспор, обладающий одинаковым паттерном вирулентности на определенных сортах пшеницы [8, 12]. В литературных источниках упоминается в среднем от 50 до 70 различных рас *U. tritici* [8, 35, 36]. Расовый состав *U. tritici* на территории нашей страны неоднороден и с каждым годом требует уточнения. На северо-западе европейской части России идентифицированы расы 15, 23, 29 и 38. В центральных районах Нечерноземной зоны были выявлены расы 2, 5, 12, 22, 26, 27, 28, 29, 38 и 54, в Центрально-Черноземной зоне обнаружены расы 4, 12, 24, 30, 31, 38, 43 и 45. В Саратовской области (юго-восток европейской части России) выявлены расы 10, 12, 13, 20, 23, 25, 29 и 41 [37, 38]. Наиболее распространенными и вирулентными расами лесостепной зоны Южного Урала являются 21, 37, 38, 43, 44, 45 [11]. На территории Западной Сибири

идентифицированы расы 1, 2, 4, 5, 8, 9, 10, 12, 21, 48, 51, 61, 62, 63, 64, 66 и 67 [37]. В Красноярском крае (Восточная Сибирь) наиболее широко распространены расы 48, 51 и 54 [8].

При классической селекции на устойчивость к грибным болезням для определения расового состава различных популяций патогена необходимо иметь тестерные линии растений, содержащие гены резистентности к заболеванию. Наиболее популярным при идентификации рас пыльной головки во многих странах мира является дифференцирующий набор, предложенный канадскими учеными [39]. Он состоит из 19 сортов пшеницы: Mindum, Kota (США), Renfrew, Florence/Aurore, Little Club/Reward, Reward, Carma/Reward, Kearney, Red Bobs, Pentad, Thatcher/Regent/Reward, Manitou*2/Giza144, Wakooma, H44/Marquis (Канада), PI 292554/CI 7795, Sonop (Намибия), Marquillo/Waratah (Канада, Кения), PI 69282, Marroqui 588 (Мексика).

В результате исследований В. И. Кривченко с соавт. было установлено, что в целом ни один из наборов сортов-дифференциаторов, принятых за рубежом, не может быть использован в российских условиях [40]. Ряд тест-сортов в наших условиях или универсально восприимчивы, или, напротив, устойчивы. Дифференцирующая способность многих сортообразцов оказалась низкой во многих регионах страны. Поэтому для определения расового состава пыльной головки в нашей стране был разработан комбинированный лабораторно-полевой метод дифференциации по характеру инфицирования частей зародыша и степени поражения растений. Новый тестерный набор состоял из девяти сортов яровой пшеницы, выделенных из мировой коллекции ВИР: Московка (Россия), Акмолинка 5 (Казахстан), Народная (Украина), Kota, Mindum (США), Preston, Reward (Канада), Rümkers Dickkopf (Германия), Диамант (Швеция) [8].

Все наборы подобраны эмпирически, т. е. по результатам наблюдения за реакцией сортов на разные расы патогена. К сожалению, даже в наборе дифференциаторов не полностью определен состав *Ut*-генов и не изучен их аллелизм. В зависимости от используемого набора, выявленные в популяции возбудителя расы обозначаются по-разному. Некоторые изоляты, определенные с помощью канадского набора сортов, идентичны выявленным В. И. Кривченко с соавт. [40]. Например, раса T18 соответствует по вирулентности расе 25 [37].

Итак, традиционные способы изучения популяции патогена занимают много времени и требуют наличия у исследователей доступа к набору сортов-дифференциаторов. При этом не всегда получается определить расу гриба по ключу рас. Это может говорить о возникновении новых рас, требующих для идентификации более современных методов. Сорта из дифференцирующих наборов также могут быть плохо приспособлены к условиям местности по продолжительности вегетационного периода и устойчивости к различным абиотическим и биотическим факторам. Кроме того, при изучении реакции сортов-тестеров в полевых условиях на полученные данные могут влиять погодные условия конкретного года. Все это снижает точность определения генетической изменчивости среди изолятов гриба [8, 15, 37].

Как и для точной диагностики заболевания, для изучения расового состава его возбудителя необходимо ввести применение современных методов, в частности, молекулярно-биологических [9].

Результаты работы по характеристике *U. tritici* с помощью молекулярных маркеров были опубликованы в 2002 году С. С. Карвасара с соавт. (S. S. Karwasra et al.) [41]. Для оценки генетической изменчивости девяти изолятов гриба, собранных в разных частях одного из штатов Индии, использовались RAPD (маркеры случайно амплифицированных полиморфных фрагментов ДНК), ISSR (маркеры межмикросателлитного полиморфизма) и AFLP-маркеры (маркеры полиморфизма длины амплифицированных фрагментов). При этом применение AFLP-маркеров дало возможность найти четкие отличия у всех девяти изолятов, а также разбить их на две большие группы.

В 2006 году З. Попович и Дж. Г. Мензис (Z. Popovic and J. G. Menzies) представили результаты оценки генетического разнообразия популяции *U. tritici* на полях Манитобы и Саскачевана (Канада) с помощью AFLP-маркеров [42]. Анализ показал высокую степень генетической изменчивости среди изолятов. Исследователи отметили, что использование AFLP позволило более точно дифференцировать изоляты, чем применение пяти пшеничных линий-тестеров. В 2009 году вышла работа Х. С. Рандхава с соавт. (H. S. Randhawa et al.), в которой ученые с помощью AFLP-маркеров подтвердили взаимосвязь между

паттернами вирулентности и молекулярно-генетического разнообразия различных штаммов *U. tritici* [43].

П. Шарма с соавт. (P. Sharma et al.) сообщили о результатах исследования генетического разнообразия шести изолятов патогена с использованием микросателлитных (SSR) маркеров [44]. В работе были отмечены положительные черты SSR-маркеров: надежность, трансферабельность (возможность использования одних и тех же SSR-маркеров при анализе разных видов), кодоминантность и высокая встречаемость в геноме. Эти качества делают микросателлитные маркеры надежным средством для изучения популяций патогенных грибов.

П. Л. Кашьяп с соавт. (P. L. Kashyap et al.) проанализировали 112 изолятов *U. tritici*, собранных в разных агроэкологических зонах Индии [15]. Для анализа изменчивости как внутри популяции, так и между разными популяциями патогена они также применяли SSR-маркеры (табл. 2).

Кроме того, у всех изолятов были амплифицированы и секвенированы фрагменты гена RPB2 (гена второй по величине субъединицы РНК-полимеразы II). Полученная информация по последовательностям позволила выделить 98 гаплотипов *U. tritici*.

Таким образом, есть все основания утверждать, что молекулярно-генетические методы способны ускорить идентификацию рас возбудителя пыльной головки пшеницы и сделать ее более точной и менее затратной. В то же время требуются дальнейшие исследования по созданию стандартизированной схемы изучения популяции возбудителя *U. tritici* с помощью ПЦР-анализа.

Генетика устойчивости пшеницы к пыльной головке. Исследование в области генетики устойчивости пшеницы к пыльной головке было начато еще в 30-х годах XX века. Однако официальная символика четырех *Ut*-генов устойчивости пшеницы к пыльной головке и состав факторов включены в каталог генных символов пшеницы Р. А. Макинтош (R. A. McIntosh) лишь в 1983 году [45]. К настоящему времени в отечественной и зарубежной литературе упоминается 22 гена устойчивости к пыльной головке (табл. 3).

Как показывают исследования В. В. Сюкова и С. Е. Поротькина, в мировой коллекции

сортов чаще всего встречается эффективный ген *Ut1*, а также идентичный или тесно сцепленный с ним *UtTh* [24]. Ген *Ut2* мало изучен и признан неэффективным ко многим расам возбудителя пыльной головни *U. tritici*. Доминантный ген *Ut3* встречается только в немецком сорте Carma. Высокой эффективностью против поражения пыльной головней характеризуется ген *Ut4* [45].

Некоторым генам (*UtM*, *UtR1*, *UtR2*, *UtCS*, *UtB*, *UtRd*, *UtNp*, *UtBW278* и *UtC29*) устойчивости к пыльной головне присвоены символы согласно сортам, в которых они были обнаружены [37].

Таким образом, усилиями ученых многих стран выявлены гены и сорта-доноры этих генов, которые можно использовать в селекции на устойчивость к пыльной головне.

Таблица 2 – Характеристики нейтральных микросателлитных маркеров для анализа генетического разнообразия популяции изолятов *Ustilago tritici* (по [15])

Table 2 – Characteristics of neutral microsatellite markers for the analysis of the genetic diversity of populations of *Ustilago tritici* isolates (according to [15])

Маркер / Marker	Прямой и обратный праймеры (5'-3') / Forward and reverse primers (5'-3')	Размер ампликона, п.н. / Amplicon size, bp	Температурный режим, °C / Temperature regime, °C
(GGA)5	GCTCGTCTACCTCTGCGATACT CTGCATCTCAATCAACCAATC	215–241	55
(CGG)6	AGACATGCACCGTAACAACAAC TACCCTCCATACTCTTGTCCTG	180–200	55
(CAT)5	AAGCATACTCAAGGCAGGGTAA GTTCTCGGATGGTCTCGTCTAC	170–240	54
(CCG)6	AAAAGTCATCCTCGTTTCGGTA AGATAGGGAAGCAAATCATGGA	180–230	55
(GAC)6	GCCTCTTCATCTCTCTCCTCAC TGACTCTTCTGCATCATATCGG	220–270	52
(TGC)5	TCTTGTGGAGTCTGCTGTTGTT GTAGCTTCAGGTCGCATCACTT	230–250	52
(AAAT)4	TCGTGAAAACAAACAGAGCCAA ACACCTATTTGCGTGAAGGAGT	220–250	52
(TATT)5	TACTTCTCCTCCTCCTCCTCCT GAACCTCGCAAAGTGGTTTCTCT	285–300	52
(CAAGG)6	AGAGACCAAGTCGAATCCAAAG CCTTGCCCTACTTCTCCCTACCT	294–320	52
(GTGTCA)4	CATTTCAAGTGTGGACAAGCAT AGAGAGTTTCGTAGTTGGGCAG	250–300	54
(AAGCCA)5	GGTGATTGGAAGACCACAGAAT GTTTTGAACCTCTCTGCTTTGGG	227–250	55
(GCTCCC)4	CACAAACACACACACACACACA CTGAACAGTAAAGCCTGAAGGG	224–750	54
(CAACGG)4	TCCTACATTGGGATGACTGATG GACTCGCTTCTTGTTCTTGTT	217–250	52
(GGAGAA)4	GAAAGAGAGAGGGAGGGAAGAG TGCGTATAGGTATGTGTGGCTT	230–250	53
(CA)8	GAAGAAAATGCTAGAGCGAAGG AGCAGAAGGTGAGAGAGCGTAT	216–250	55
(GA)8	ATGAGGTCAAGAGTCAGCAACA ATTCGTCAAGATGCCTTTCACT	175–200	54

Таблица 3 – Гены устойчивости пшеницы к пыльной головне /
Table 3 – Genes of wheat resistance to loose smut

Ген / Gene	Хромосомная локализация / Chromosomal localization	Доноры гена / Gene donors	Источник / Source
<i>Ut1</i> (<i>UtTh</i>)	7B (3D, 6AS)	Renfrew, Red Bobs, Marquis, Thatcher, Neepawa, Manitou, Безенчукская 98, Жигулевская / 'Bezenchukskaya 98', 'Zhigulevskaya'	[24]
<i>Ut2</i>	-	Kota, Little Club	[45]
<i>Ut3</i>	-	Carma	[45]
<i>Ut4</i>	7A, 7B	Hope, CN-18131, 9340-CP, Glenlea, TD12A	[45]
<i>Ut5</i>	-	Sonop, NP-824, Col.222	[46]
<i>Ut6</i>	5BL	AC Foremost, AC Karma, ES54 (Burnside), Glenlea, PT459	[13,47,48]
<i>Ut7</i>	7A	SC8021V2'	[47]
<i>Ut8</i>	3A	9340-CP, Glenlea	[47]
<i>Ut9</i>	6B	SC8021V2'	[47]
<i>Ut10</i>	6D	SC8021V2'	[47]
<i>Ut11</i>	7BS	TD-14 (Sonop)	[46]
<i>Utx</i>	2BL	Biggar BSR, Misr-3	[23,49]
<i>UtM</i>	-	Mara, Mirs 3	[24]
<i>UtR1</i>	-	Тулайковская юбилейная / 'Tulaykovskaya yubileynaya'	[24]
<i>UtR2</i>	-	Veery's	[24]
<i>UtCS</i>	2A (1AS, 1BS, 1DS)	Chinese Spring	[24]
<i>UtB</i>	-	Ботаническая 2, Харьковская 10 / 'Botanicheskaya 2,' 'Kharkovskaya 10'	[24]
<i>UtRd</i>	-	Reward	[37]
<i>UtNp</i>	-	Neepawa	[37]
<i>UtBW278</i>	5BS	Harvest, Snowstar, Waskada, Unity, Shaw, Glenn, Vesper, Cardale, AAC Jatharia, AAC Cameron, Carberry, AAC Brandon, AAC Magnet, Burnside, Pasteur, AAC Iceberg, Whitehawk, Peace, AAC Redwater, CDC Plentiful, CDC Titanium, Parata, Selkirk	[13,35]
<i>Utd1</i>	5BS	D93213, P9162-BJ08*B	[34]
<i>UtC29</i>	-	Саратовская 29 / 'Saratovskaya 29'	[37]

ДНК-маркеры, сцепленные с генами и локусами устойчивости пшеницы к пыльной головне. Одной из задач молекулярной генетики является картирование и клонирование генов, контролирующих важные признаки сельскохозяйственных культур. Секвенирование генов устойчивости позволяет выявить мутации, характерные для проявления признака, понять биохимическую природу устойчивости, разработать ген-специфичные молекулярные маркеры и облегчить процесс создания новых сортов [17, 19, 50, 51]. На данный момент клонировано уже более 45 различных *R*-генов

пшеницы [52]. К сожалению, ни в отечественных, ни в зарубежных источниках пока нет сообщений о клонированных генах устойчивости пшеницы к пыльной головне. Зато доступна информация о различных молекулярных маркерах, тесно связанных с признаком. Их применение дает преимущество для селекции, ведь результаты анализа ДНК не зависят от стадии развития изучаемого растения или погодных условий.

В таблице 4 представлены ДНК-маркеры, сцепленные с генами расоспецифической устойчивости мягкой и твердой пшеницы

к пыльной головне. Каждый из данных генов может защитить растения от одной или нескольких рас *U. tritici*. С конца XX века по настоящее время для их идентификации были использованы различные технологии: уже упомянутые в предыдущем разделе маркеры RAPD, AFLP и SSR, а также RFLP (маркеры полиморфизма длины рестрикционных фрагментов), SCAR (амплифицированные области, охарактеризо-

ванные нуклеотидной последовательностью) и SNP (маркеры однонуклеотидного полиморфизма). Основное внимание в исследованиях уделяется разработке молекулярных маркеров и их применению для изучения исходного материала в селекции. Сообщений об успешном создании новых устойчивых к пыльной головне сортов пшеницы методом MAS-селекции в литературе на данный момент не отмечено.

Таблица 4 – ДНК-маркеры генов устойчивости пшеницы к пыльной головне /
Table 4 – DNA markers of wheat resistance genes to loose smut

Ген / Gene	Хромосомная локализация / Chromosomal localization	Тип маркера / Type of marker	Маркер / Marker	Раса возбудителя / The race of the pathogen	Источник / Source
<i>UtBW278*</i>	5BS	SSR, SCAR, SNP	<i>Xgwm443, Xgpw7180, Xgpw4098, Xwmc740, Xbarc216, Xbarc4 Xkwm779</i>	T9	[35] [13]
<i>Utd1</i>	5BS	AFLP, SSR, SCAR	<i>Xgwm443, Xgwm234</i>	T33	[34]
<i>Utx</i>	2BL	RAPD, RFLP, SCAR	<i>Xcrc4.2</i>	T10	[23, 49]
<i>Ut4</i>	7B	SSR	<i>Xgwm302, Xwmc723, Xgwm333, Xgwm577</i>	T2, T9, T15, T27	[47]
<i>Ut6</i>	5BL	SSR	<i>Xgpw5029, Xbarc232, Xwmc160, Xwmc734, Xgdm133a, Xgwm604</i>	T2, T10, T15, T19, T39	[13, 47, 48]
<i>Ut7</i>	7A	SSR	<i>Xcfa22576, Xcfa2240, Xcfa2019</i>	T-9	[47]
<i>Ut8</i>	3A	SSR	<i>Xwmc559, Xbarc69</i>	T9, T19, T39	[47]
<i>Ut9</i>	6B	SSR	<i>Xbarc223, Xbarc332, Xgwm508</i>	T39	[47]
<i>Ut10</i>	6D	SSR	<i>Xbarc183</i>	T10	[47]
<i>Ut11</i>	7BS	SNP	BS00022562_51, Excalibur_c3489_182, Kukri rep c71778 644	T2	[46]

*М. Т. Касса с соавт. (M. T. Kassa et al.) отмечают, что гены *UtBW278* и *Utd1* имеют общие близкорасположенные маркеры, но не являются полностью идентичными [35] /

*M. T. Case et al. note that the *UtBW278* and *Utd1* genes share closely related markers, but are not completely identical [35]

Устойчивость к пыльной головне может наследоваться и как качественный, и как количественный признак [12, 20, 47]. Как уже говорилось ранее, для эффективной защиты посевов сорта должны обладать генетическим разнообразием. Речь идет как о пирамидировании генов расоспецифической устойчивости в рамках одного генотипа, так и о сочетании

разных типов устойчивости. Использование молекулярных маркеров, сцепленных с генами и локусами, позволяет проводить точный и быстрый скрининг исходного материала, а также контролировать передачу признака из поколения в поколение в ходе селекционного процесса, в т. ч. работая с несколькими локусами одновременно.

Помимо расоспецифических генов устойчивости, исследователей также интересуют локусы количественных признаков (QTLs) и сцепленные с ними ДНК-маркеры. QTLs определяются в картирующих популяциях или с помощью полногеномного ассоциативного анализа (GWAS) различными статистическими методами [53]. Часто они обеспечивают менее выраженную устойчивость, но более длительную, т. к. патогенам сложнее преодолеть количественную устойчивость растений. Моногенная же устойчивость сорта, особенно при его повсеместном возделывании, провоцирует эволюционный скачок в популяции патогена в регионе возделывания, что приводит к потере эффективности используемого гена [20, 50]. При этом главные QTLs, определяющие устойчивость пшеницы к пыльной головне, могут соотноситься по хромосомной локализации с генами расоспецифической устойчивости [47].

Интересна недавняя статья Д. К. Сайни с соавт. (D. K. Saini et al.), которая представляет собой мета-анализ QTLs устойчивости мягкой пшеницы к болезням [54]. В данной работе использовались и выявленные в более ранних исследованиях 14 QTLs устойчивости к пыльной головне. Создание общей консенсусной карты сцепления показало положение локусов устойчивости к заболеванию на хромосомах 3A, 3B, 4B, 5B, 6B, 7A и 7B.

В 2018 году опубликована работа С. Кумар с соавт. (S. Kumar et al.), особенностью которой было картирование QTLs, связанных с устойчивостью твердой пшеницы к пыльной головне [16]. С помощью SNP-генотипирования идентифицировали три локуса, один из которых, обуславливающий 74 % фенотипической устойчивости, рекомендован для дальнейшего использования в селекции.

Еще один подход предполагает определение взаимосвязи между устойчивостью пшеницы к пыльной головне и ДНК-маркером без выделения предполагаемых связанных генов или QTLs [55, 56]. Например, в работе М. И. Хассан с соавт. (M. I. Hassan et al.) было идентифицировано пять SSR-маркеров, которые давали позитивные аллели, сцепленные

с устойчивостью к пыльной головне [55]. Авторы отмечают, что для подтверждения полезности применения данных маркеров в селекции необходимы дальнейшие исследования.

Заключение. Основной задачей современного селекционера является поиск и внедрение в схемы создания сортов исходного материала, разнообразного по типам устойчивости и генам, которые ее контролируют. Как для точной диагностики заболевания, так и для изучения расового состава его возбудителя необходимо ввести применение современных методов, в частности, молекулярно-биологических. Эти методы способны ускорить идентификацию рас возбудителя пыльной головки пшеницы и сделать ее более точной и менее затратной. В то же время требуются дальнейшие исследования по созданию стандартизированной схемы изучения популяции возбудителя *U. tritici* с помощью ПЦР-анализа.

Метод количественной ПЦР-РВ (ПЦР в режиме реального времени) имеет высокий потенциал для селекции устойчивых к пыльной головне сортов, так как детекция возбудителя в динамике развития в тканях растения возможна уже на стадии проростков как яровых, так и озимых сортов.

Выявлены гены и сорта-доноры этих генов, которые можно использовать в селекции на устойчивость к пыльной головне. Применение молекулярных маркеров, сцепленных с генами и локусами, позволяет проводить точный и быстрый скрининг исходного материала, а также контролировать передачу признака из поколения в поколение в ходе селекционного процесса, в т. ч. работая с несколькими локусами одновременно.

Идентифицированы маркеры, связанные с генами расоспецифической устойчивости, основной областью применения которых является скрининг исходного материала для поиска источников устойчивости к заболеванию.

Рассмотренные в нашем обзоре результаты исследований говорят о наличии достаточно большой базы данных для использования ПЦР-маркеров при создании сортов пшеницы, устойчивых к пыльной головне.

References

1. Гончарова Н. З., Терентьев С. Е., Воробьева Е. С. Состояние и развитие российского рынка зерна и муки в условиях международных экономических санкций. Вестник Адыгейского государственного университета. Серия: Экономика. 2022;4(310):55–64. DOI: <https://doi.org/10.53598/2410-3683-2022-4-310-55-64> EDN: XMMMCW

- Goncharova N. Z., Terentyev S. E., Vorobyova E. S. The state and development of the Russian grain and flour market in the context of international economic sanctions. *Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo uni-versiteta. Seriya: Ekonomika* = The Bulletin of the Adyghe State University, Series «Economics». 2022;4(310):55–64. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.53598/2410-3683-2022-4-310-55-64>
2. Hanson H. Wheat in the third world. New York: Routledge, 2021. pp. 194. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429267505>
3. Saini D. K., Chahal A., Pal N., Srivastava P., Gupta P. K. Meta-analysis reveals consensus genomic regions associated with multiple disease resistance in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Molecular Breeding*. 2022;42(3):11. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11032-022-01282-z>
4. Jabran M., Ali M. A., Zahoor A., Muhac-Ud-Din G., Liu T., Chen W., Gao L. Intelligent reprogramming of wheat for enhancement of fungal and nematode disease resistance using advanced molecular techniques. *Frontiers in Plant Science*. 2023;14:1132699. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1132699>
5. Yan H., Zhang J., Ma D., Yin J. qPCR and loop mediated isothermal amplification for rapid detection of *Ustilago tritici*. *PeerJ*. 2019;(7):e7766. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.7766>
6. Репникова Е. Г., Зеленева Ю. В., Судникова В. П. Головные болезни пшеницы на территории центрально-чернозёмного заповедника, выявление источников и доноров устойчивости. *Научные труды Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия*. 2020;29:214–221. DOI: <https://doi.org/10.30679/2587-9847-2020-29-214-221> EDN: XNREHN
- Repnikova E. G., Zeleneva Yu. V., Sudnikova V. P. Wheat smut diseases on the central chernozem reserve territory, identification of sources and donors of resistance. *Nauchnye trudy Severo-Kavkazskogo federal'nogo nauchnogo tsentra sadovodstva, vinogradarstva, vinodeliya*. 2020;29:214–221. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30679/2587-9847-2020-29-214-221>
7. Maulenbay A., Rsaliyev A. Fungal disease tolerance with a focus on wheat: a review. *Journal of Fungi*. 2024;10(7):482. DOI: <https://doi.org/10.3390/jof10070482>
8. Орлова Е. А., Бехтольд Н. П. Характеристика генофонда яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) по устойчивости к пыльной головне в условиях лесостепи Западной Сибири. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2019;23(5):551–558. DOI: <https://doi.org/10.18699/VJ19.524> EDN: PIVINY
- Orlova E. A., Baechtold N. P. characteristics of the gene pool of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) for resistance to loose smut in the forest-steppe of Western Siberia. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i seleksii*. = Vavilov Journal of Genetics and Breeding 2019;23(5):551–558. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18699/VJ19.524>
9. Ганнибал Ф. Б., Гагкаева Т. Ю., Гомжина М. М., Полуэктова Е. В., Гульяева Е. И. Ассоциированные с пшеницей микромицеты и их значимость как возбудителей болезней в России. *Вестник защиты растений*. 2022;105(4):164–180. DOI: <https://doi.org/10.31993/2308-6459-2022-105-4-15508> EDN: KLHPMB
- Gannibal F. B., Gagkaeva T. Yu., Gomzhina M. M., Poluektova E. V., Gulyaeva E. I. Micromycetes associated with wheat and their significance as pathogens in Russia. *Vestnik zashchity rasteniy* = Plant Protection News. 2022;105(4):164–180. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31993/2308-6459-2022-105-4-15508>
10. Кекало А. Ю., Немченко В. В., Заргарян Н. Ю., Цыпышева М. Ю. Защита зерновых культур от болезней. Куртамыш: Куртамышская типография, 2017. 172 с. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29053721> EDN: YLUIUB
- Kekalo A. Yu., Nemchenko V. V., Zargaryan N. Yu., Tsypysheva M. Yu. Protection of grain crops from diseases. *Kurtamysh: Kurtamyshskaya tipografiya*, 2017. 172 p. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29053721>
11. Грязнов А. А. Расоспецифическая устойчивость пшеницы к пыльной головне. АПК России. 2018;25(1):25–30. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32484898> EDN: YPUHGJ
- Gryaznov A. A. Racespecific resistance of wheat to loose smut. *APK Rossii* = Agro-Industrial Complex of Russia. 2018;25(1):25–30. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32484898>
12. Abraham A. Loose smut of wheat (*Ustilago tritici*) and its managements. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*. 2019;9(8):25–33. DOI: <https://doi.org/10.7176/JBAH>
13. Toth J., Pandurangan S., Burt A., Mitchell Fetch J., Kumar S. Marker-assisted breeding of hexaploid spring wheat in the Canadian prairies. *Canadian journal of plant science*. 2018;99(2):111–127. DOI: <http://doi.org/10.1139/cjps-2018-0183>
14. Назаров П. А., Балеев Д. Н., Иванова М. И., Соколова Л. М., Каракозова М. В. Инфекционные болезни растений: этиология, современное состояние, проблемы и перспективы защиты растений. *Acta Naturae*. 2020;12(3):46–59. DOI: <https://doi.org/10.32607/actanaturae.11026> EDN: AKBYXI
- Nazarov P. A., Baleev D. N., Ivanova M. I., Sokolova L. M., Karakozova M. V. Infectious plant diseases: etiology, current status, problems and prospects in plant protection. *Acta Naturae*. 2020;12(3):46–59. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32607/actanaturae.11026>
15. Kashyap P. L., Kumar S., Tripathi R., Kumar R. S., Jasrotia P., Singh D. P., Singh G. P. Phylogeography and population structure analysis reveal diversity by gene flow and mutation in *Ustilago segetum* (Pers.) Roussel *tritici* causing loose smut of wheat. *Frontiers in Microbiology*. 2019;10:01072. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01072>

16. Kumar S., Knox R. E., Singh A. K., DePauw R. M., Campbell H. L., Isidro-Sanchez J., et al. High-density genetic mapping of a major QTL for resistance to multiple races of loose smut in a tetraploid wheat cross. *PLoS One*. 2018;13(2):e0192261. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192261>
17. Афанасенко О. С. Генетическая защита зерновых культур: итоги и перспективы. Защита и карантин растений. 2020;(9):3–7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43909497> EDN: TYQUEV
Afanasenko O. S. Genetic protection of grain crops: results and prospects. *Zashchita i karantin rasteniy*. 2020;(9):3–7. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43909497>
18. Hasan N., Choudhary S., Naaz N., Sharma N., Laskar R. A. Recent advancements in molecular marker-assisted selection and applications in plant breeding programmes. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*. 2021;19(1):128. DOI: <https://doi.org/10.1186/s43141-021-00231-1>
19. Luo K., He D., Guo J., Li G., Li B., Chen X. Molecular advances in breeding for durable resistance against pests and diseases in wheat: Opportunities and challenges. *Agronomy*. 2023;13(3):628. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13030628>
20. Zuo W., Ökmen B., Depotter J. R. L., Ebert M. K., Redkar A., Villamil J. M., Doehlemann G. Molecular interactions between smut fungi and their host plants. *Annual Review of Phytopathology*. 2019;57:411–430. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082718-100139>
21. Nagarajan N., Khan M., Djamei A. Manipulation of auxin signaling by smut fungi during plant colonization. *Journal of Fungi*. 2023;9(12):1184. DOI: <https://doi.org/10.3390/jof9121184>
22. Дружин А. Е. Влияние изменений климата на структуру популяций патогенов яровой пшеницы в Поволжье. Аграрный вестник Юго-Востока. 2010;(1):31–35. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26725203> EDN: WMVNGF
Druzhin A. E. Effect of climate change on the structure of populations of spring wheat pathogens in the Volga region. *Agrarnyy vestnik Yugo-Vostoka* = Agrarian Reporter of South-East. 2010;(1):31–35. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26725203>
23. Draz I. S., Darwish A. K., Abou-Elsoud M. S., Ellassal A. A., Komeil D. A. Molecular discovery of new allele associated with loose smut resistance gene *Ut-X* in spring wheat. *Agronomy Research*. 2021;19(1):74–82. DOI: <https://doi.org/10.15159/AR.21.055>
24. Сюков В. В., Поротькин С. Е. Генетика устойчивости мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) к пыльной головне (*Ustilago tritici* (Pers.) Jens.) (обзор). Вавиловский журнал генетики и селекции. 2015;18(3):517–522. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22479659> EDN: SXXZIR
Syukov V. V., Porotkin S. E. Genetics of common wheat (*Triticum aestivum* L.) resistance to loose smut (*Ustilago tritici* (Pers.) Jens.) (review). *Vavilovskiy zhurnal genetiki i seleksii* = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2015;18(3):517–522. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22479659>
25. Shafikova T. N., Omelichkina Yu. V. Evolution of views on plant immunity: from Flor's "gene-for-gene" theory to the "zig-zag model" developed by Jones and Dangl. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya* = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2020;10(3):424–438. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-3-424-438>
26. Ökmen B., Schwammbach D., Bakkeren G., Neumann U., Doehlemann G. The *Ustilago hordei*-barley interaction is a versatile system for characterization of fungal effectors. *Journal of Fungi*. 2021;7(2):86. DOI: <https://doi.org/10.3390/jof7020086>
27. Wunderle J., Leclercque A., Schaffrath U., Slusarenko A., Koch E. Assessment of the loose smut fungi (*Ustilago nuda* and *U. tritici*) in tissues of barley and wheat by fluorescence microscopy and real-time PCR. *European journal of plant pathology*. 2012;133:865–875. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10658-012-0010-9>
28. Francesconi S. High-throughput and point-of-care detection of wheat fungal diseases: Potentialities of molecular and phenomics techniques toward in-field applicability. *Frontiers in Agronomy*. 2022;4:980083. DOI: <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.980083>
29. Башкирова И. Г., Каримова Е. В., Смирнова И. П. Исследование праймеров для диагностики фитоплазм из группы Apple proliferation. Фитосанитария. Карантин растений. 2022;(3):26–36. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=51314769> EDN: FZTABW
Bashkirova I. G., Karimova E. V., Smirnova I. P. Study of primers for the diagnosis of phytoplasmas from the apple proliferation group. *Fitosanitariya. Karantin rasteniy* = Plant Health and Quarantine. 2022;(3):26–36. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=51314769>
30. Камченков А. М., Цветкова Ю. В., Кузнецова А. А., Дудченко И. П., Усманова Г. Р. Оценка применимости классических и молекулярных методов диагностики возбудителя *Bipolaris zeicola* (Stout) Shoemaker в лабораторных условиях. Фитосанитария. Карантин растений. 2022;(4):33–45. DOI: <https://doi.org/10.69536/g6406-7929-8405-a> EDN: RHLXLE
Kamchenkov A. V., Tsvetkova Yu. V., Kuznetsova A. A., Duchenko I. P., Usmanova G. R. Evaluation of the applicability of classical and molecular methods for diagnosing the phytopathogen *Bipolaris zeicola* (Stout) Shoemaker in laboratory conditions. *Fitosanitariya. Karantin rasteniy* = Plant Health and Quarantine. 2022;(4):33–45. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.69536/g6406-7929-8405-a>

31. Бессолицына Е. А., Тулинов А. Г., Новоселова Н. В., Харина А. В. Разработка ПЦР-тест системы для выявления вируса картофеля Y. Известия Коми научного центра УрО РАН. 2023;7(65):5–11.
DOI: <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2023-7-5-11> EDN: PYTGKE
- Bessolitsyna E. A., Tulinov A. G., Novoselova N. V., Kharina A. V. Development of a PCR test system for the detection of potato virus Y. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN* = Proceedings of the Komi science centre Ural branch Russian academy of sciences. 2023;7(65):5–11. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2023-7-5-11>
32. Willits D. A., Sherwood J. E. Polymerase chain reaction detection of *Ustilago hordei* in leaves of susceptible and resistant barley varieties. *Phytopathology*. 1999;89(3):212–217.
DOI: <https://doi.org/10.1094/PHYTO.1999.89.3.212>
33. Omara R. I., Sehsah M. D., Shaheen D. M., Saad El-Din H. I., Abdelghany R., Mandour A. M., Shahin A. A. A quick PCR detection of *Ustilago tritici* for early control of loose smut in wheat using TiO₂ and ZnO nanoparticles. *Egyptian Journal of Agricultural Research*. 2023;101(4):1112–1123.
DOI: <https://doi.org/10.21608/EJAR.2023.242715.1448>
34. Randhawa H. S., Popovic Z., Menzies J., Knox R., Fox S. Genetics and identification of molecular markers linked to resistance to loose smut (*Ustilago tritici*) race T33 in durum wheat. *Euphytica*. 2009;169:151–157.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10681-009-9903-x>
35. Kassa M. T., Menzies J. G., McCartney C. A. Mapping of a resistance gene to loose smut (*Ustilago tritici*) from the Canadian wheat breeding line BW278. *Molecular Breeding*. 2015;35(9):180.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11032-015-0369-3>
36. Mishra K. K., Kant L., Kumari J., Kumar A. Mining of the national gene bank collection identifies resistance sources for loose smut of wheat in Northern Himalayan conditions. *Indian Phytopathology*. 2022;75(4):1179–1183. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42360-022-00540-6>
37. Дружин А. Е., Крупнов В. А. Пшеница и пыльная головня. Саратов: Саратовский университет, 2008. 164 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19512762> EDN: QKZYIL
- Druzhin A. E., Krupnov V. A. Wheat and loose smut. *Saratov: Saratovskiy universitet*, 2008. 164 p.
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19512762>
38. Дружин А. Е. Расовая дифференциация *Ustilago tritici* (Pers). Rostr. в Саратовской области с использованием канадских и советских сортов-дифференциаторов. Аграрный вестник Юго-Востока. 2009;(2):18–22. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26725161> EDN: WMVMQB
- Druzhin A. E. Races differentiation *Ustilago tritici* (Pers.) Jens. in the Saratov area using canadian and soviet cultivars – differentials. *Agrarnyy vestnik Yugo-Vostoka* = Agrarian Reporter of South-East. 2009;(2):18–22. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26725161>
39. Nielsen J. J., Thomas P. Loose smut. Chapter 4. In: R. D. Wilcoxson and E. E. Saari Bunt and smut diseases of wheat. Loose smut. Concepts and methods of diseases management. Mexico, D.F. CIMMYT, 1996. pp. 33–47. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/11350921/bunt-and-smut-diseases-of-wheat-cimmyt>
40. Кривченко В. И., Мягкова Д. В., Щелко Л. Г., Тимошенко З. В. Изучение устойчивости зерновых культур и расового состава возбудителей головневых болезней. Л., 1978. 107 с.
- Krivchenko V. I., Myagkova D. V., Shchelko L. G., Timoshenko Z. V. Study of the stability of grain crops and the racial composition of the causative agents of head diseases. Leningrad, 1978. 107 p.
41. Karwasra S. S., Mukherjee A. K., Swain S. C., Mohapatra T., Sharma R. P. Evaluation of RAPD, ISSR and AFLP markers for characterization of the loose smut fungus *Ustilago tritici*. *Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology*. 2002;11:99–103. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03263143>
42. Popovic Z., Menzies J. G. Intensive and extensive sampling techniques used to measure genetic diversity of *Ustilago tritici*, using virulence and DNA polymorphism. *Canadian journal of plant pathology*. 2006;28(2):197–207.
DOI: <https://doi.org/10.1080/07060660609507287>
43. Randhawa H. S., Matheson F., Menzies J. G., Fox S. L. Molecular and virulence relationships among races of *Ustilago tritici* collected from durum and bread wheat. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 2009;31(2):220–231.
DOI: <https://doi.org/10.1080/07060660909507595>
44. Sharma P., Shefali Pandey B., Muthusamy S. K., Kumar S., Saharan M. S., Kumar S., et al. Development and validation of microsatellite markers for Karnal bunt (*Tilletia indica*) and loose smut (*Ustilago segetum tritici*) of wheat from related fungal species. *Journal of Phytopathology*. 2018;166(10):729–738.
DOI: <https://doi.org/10.1111/jph.12756>
45. Nielsen J. J. Inheritance of virulence of *Ustilago tritici* on the differential cultivars Carma, Red Bobs and a derivative of the cross Thatcher x Regent. *Canadian journal of botany*. 1982;60:1191–1193.
DOI: <https://doi.org/10.1139/b82-148>
46. Thambugala D., Menzies J. G., Knox R. E., Campbell H. L., McCarthney C. A. Genetic analysis of loose smut (*Ustilago tritici*) resistance in Sonop spring wheat. *BMC Plant Biology*. 2020;20(1):314.
DOI: <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02525-x>

47. Knox R. E., Campbell H. L., Clarke F. R., Menzies J. G., Popovic Z., Procnier J. D., et al. Quantitative trait loci for resistance in wheat (*Triticum aestivum*) to *Ustilago tritici*. Canadian Journal of Plant Pathology. 2014;36(2):187–201. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/07060661.2014.905497>
48. Kassa M. T., Menzies J. G., McCartney C. A. Mapping of the loose smut resistance gene *Ut6* in wheat (*Triticum aestivum* L.). Molecular breeding. 2014;33:569–576. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11032-013-9973-2>
49. Procnier J. D., Gray M. A., Howes N. K., Knox R. E., Bernier A. M. DNA markers linked to a T10 loose smut resistance gene in wheat (*Triticum aestivum* L.). Genome. 1997;40(2):176–179. DOI: <https://doi.org/10.1139/g97-025>
50. Colasuonno P., Marcotuli I., Gadaleta A., Soriano M. From genetic maps to QTL cloning: an overview for durum wheat. Plants. 2021;10(2):315. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10020315>
51. Kaur B., Bhatia D., Mavi G. S. Eighty years of gene-for-gene relationship and its applications in identification and utilization of R genes. Journal of genetics. 2021;100(2):50. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12041-021-01300-7>
52. Hafeez A., Sanu A., Ghosh S., Gilbert D., Bowden R. L., Wulff B. B. N. Creation and judicious application of a wheat resistance gene atlas. Molecular Plant. 2021;4(7):1053–1070. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.05.014>
53. Хлесткина Е. К. Молекулярные методы анализа структурно-функциональной организации генов и геномов высших растений. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2011;15(4):757–768. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17317750> EDN: OOBZTB
- Khlestkina E. K. Molecular methods of the analysis of the structural and functional organization of genes and genomes in higher plants. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i seleksii* = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2011;15(4):757–768. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17317750>
54. Saini D. K., Srivastava P., Pal N., Gupta P. K. Meta QTLs, ortho-meta-QTLs and candidate genes for grain yield and associated traits in wheat (*Triticum aestivum* L.). Theoretical and Applied Genetics. 2022;135(3):1049–1081. DOI <https://doi.org/10.1007/s00122-021-04018-3>
55. Hassan M. I., Mahmoud A. F., Amein K. A. Bulk segregant analysis to identify SSR markers for loose smut resistance in bread wheat. Scientific Journal of Agricultural Sciences. 2021;3(1):119–130. DOI: <https://doi.org/10.21608/sjas.2021.62206.1070>
56. Garg B., Yashveer S., Taunk J., Singh V., Redhu N. S., Tokas J., et al. Characterization of wheat (*Triticum aestivum*) genotypes for multiple fungal resistance using functional markers. The Indian Journal of Agricultural Sciences. 2023;93(1):30–35. DOI: <https://doi.org/10.56093/ijas.v93i1.129567>

Сведения об авторах

✉ **Харина Анастасия Владимировна**, кандидат с.-х. 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/0000-0002-0554-5814>, e-mail: Khavchas@yandex.ru

Новоселова Нина Владиславовна, младший 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/0000-0002-0638-4258>

Information about the authors

✉ **Anastasia V. Kharina**, PhD in Agricultural Science, researcher, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, 166-a Lenin str., Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0554-5814>, e-mail: Khavchas@yandex.ru

Nina V. Novoselova, junior researcher, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, 166-a Lenin str., Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0638-4258>

✉ – Для контактов / Corresponding author

Роль системы цитохромов в биотрансформации ксенобиотиков и лекарственных средств (обзор)

© 2025. В. С. Понамарёв[✉], О. С. Попова, О. А. Украинская

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Вещества, не являющиеся естественными метаболитами для организма млекопитающих и представляющие собой потенциально токсичные соединения, в современной науке называют ксенобиотиками. В связи с интенсификацией химической и фармацевтической промышленности концентрация таких соединений в воздухе, воде, почве и кормах для животных возрастает соразмерно увеличению производственных оборотов специализированных предприятий. Биотрансформация ксенобиотиков и лекарственных средств, или процесс детоксикации, является естественным и наиболее эффективным путем удаления из живого организма метаболитов чужеродной природы. В данном процессе принимают активное участие специальные ферментные системы, в числе которых и система цитохромов. Функции и роль отдельных типов цитохромов семейства P450 в процессе биотрансформации ксенобиотиков у животных и человека частично изучены деятелями естественнонаучной области, однако значительное количество ферментов находится на стадии исследований. В обзоре представлен анализ результатов 60 научных публикаций по проблеме биотрансформации ксенобиотиков посредством систем цитохрома, выявлены основные особенности этого процесса и дан прогноз его использования при диагностике различных патологий.

Ключевые слова: цитохромы P450, ферментные системы, системы детоксикации, микросомальный монооксигеназный комплекс, CYP

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 24-76-10011 (<https://rscf.ru/project/24-76-10011/>)

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Понамарёв В. С., Попова О. С., Украинская О. А. Роль системы цитохромов в биотрансформации ксенобиотиков и лекарственных средств (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2025;26(1):21–39. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.21-39>

Поступила: 26.09.2024

Принята к публикации: 06.02.2025

Опубликована онлайн: 26.02.2025

The role of the cytochrome system in the biotransformation of xenobiotics and pharmacaueticals (review)

© 2025. Vladimir S. Ponamarev[✉], Olga S. Popova, Olga A. Ukrainskaya

Saint Petersburg State University of Veterinary Medicine, Saint Petersburg, Russian Federation

Modern science refers to substances that are potentially toxic and not natural metabolites for the mammalian organism as xenobiotics. Due to the intensification of the chemical and pharmaceutical industries, the concentration of such compounds in the air, water, soil, and animal feed increases proportionally to the increase in production turnover of specialized enterprises. The biotransformation of xenobiotics and medicines, or the detoxification process, is a natural and most effective way to remove foreign metabolites from a living organism. Special enzyme systems take an active part in this process, including the cytochrome system. The functions and role of individual types of P450 cytochromes in the process of xenobiotic biotransformation in animals and humans have been partially studied, but a significant number of enzymes are at the research stage. The review provides the analysis of the results of 60 scientific articles on the problem of biotransformation of xenobiotics by the cytochrome systems, the basic features of this process are revealed and the estimates of its application for the diagnostics of different pathologies is given.

Key words: cytochromes P450, enzyme systems, detoxification systems, microsomal monooxygenase complex, CYP

Acknowledgments: the research was carried out under the financial support of the Russian Science Foundation project No.24-76-10011 (<https://rscf.ru/project/24-76-10011/>).

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: Ponamarev V. S., Popova O. S., Ukrainskaya O. A. The role of the cytochrome system in the biotransformation of xenobiotics and pharmacaueticals (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):21–39. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.21-39>

Received: 26.09.2024

Accepted for publication: 06.02.2025

Published online: 26.02.2025

В последние годы среди научных исследователей естественно-научной сферы наблюдается рост интереса к проблеме химического загрязнения окружающей среды¹ [1, 2, 3, 4]. В связи с этим одним из наиболее динамичных направлений современной физиологии, биологической химии и токсикологии является исследование молекулярных механизмов поддержания организмом гомеостаза² [5, 6]. К числу первостепенных задач, стоящих в настоящее время перед научными деятелями, относится изучение ферментных систем, активно участвующих в биохимическом преобразовании и выведении молекул ксенобиотиков и лекарственных средств [7, 8, 9]. Сбор данных о ферментах биотрансформации и их функциональных аспектах в организме млекопитающих при различных физиологических и патологических состояниях в перспективе позволит проводить мониторинг уровня чувствительности животного к интоксикациям, а также в какой-то степени регулировать степень резистентности организма в отношении контактных и неконтактных болезней.

Актуальность изучения данной системы обуславливается возрастающей экспрессией и разнообразием ксенобиотиков, с которыми сталкиваются живые организмы в условиях современного мира [10, 11]. Понимание механизмов, лежащих в основе их метаболизма, критически важно для разработки безопасных и эффективных лекарственных средств, а также для оценки риска воздействия окружающей среды на здоровье животных. Важность системы цитохромов также заключается в её влиянии на индивидуальные различия в метаболизме, что может привести к вариативности в фармакологических ответах при введении различных лекарственных средств [12].

Цель обзора – анализ результатов опубликованных научных исследований по проблеме биотрансформации ксенобиотиков посредством систем цитохрома, выявление основных особенностей данного процесса и прогнозирование его использования при диагностике различных патологий.

Материал и методы. В качестве основных источников информации были использованы 60 научных публикаций, в которых представлены результаты исследований отечественных и зарубежных деятелей в сфере токсикологии, биологической химии, физиологии

(нормальной и патологической) и фармакологии за последние десять лет. Поиск необходимой информации по исследуемой теме был осуществлен в открытых электронных библиографических базах – «CyberLeninka», Pubmed, ScienceDirect, eLibrary, Elsevier, Clarivate, а также в библиотечной системе университета по таким ключевым словосочетаниям, как «цитохромы и биотрансформация», «цитохромы и фармакокинетика», «цитохром и токсикокинетика». Основным критерий использования материала найденных статей – наличие критически важной для понимания темы информации и количество цитирований. В качестве ключевых методов в ходе данного теоретического исследования были использованы принципы анализа отдельных элементов изученных материалов, их суммирование и синтез.

Основная часть. Общие сведения о роли системы цитохрома в биотрансформации. Особенности индивидуальной реакции организма на соединения токсической природы и лекарственные вещества определяются, в том числе, набором различных ферментов детоксикации. Биотрансформация ксенобиотиков представляет собой сложный трехступенчатый процесс, состоящий из следующих этапов: активация (I фаза), собственно детоксикация (II фаза) и выведение (III фаза) [13, 14, 15].

В ходе первого этапа осуществляется окислительно-восстановительное или гидролитическое преобразование исходной молекулы чужеродного соединения, в результате чего она приобретает полярные функциональные группы и, следовательно, гидрофильные свойства, а также становится более реакционно-способной, то есть более токсичной [14]. Данный метаболит называют промежуточным или реактивным. По своей природе он является нестабильным звеном биотрансформации, легко подвергающимся дальнейшим преобразованиям [15, 16]. Главная опасность продукта первой фазы заключается в угрозе повреждения биологических систем на молекулярном уровне. На данном этапе ключевая роль в осуществлении реакций окислительно-восстановительного и гидролитического типа принадлежит таким ферментам, как алкогольдегидрогеназа, альдегиддегидрогеназа, пероксидаза, эстераза, амидаза, флавиносодержащим монооксигеназам и, в особенности, монооксигеназам семейства цитохромов P450 (CYP1-CYP3, рис. 1.) [9, 14].

¹Вергейчик Т.Х. Токсикологическая химия: учебник. М., 2013. 432 с.

²Нельсон Д., Кокс М. Основы биохимии Ленинджера: в 3 т. М.: Бином, 2014. 636 с.

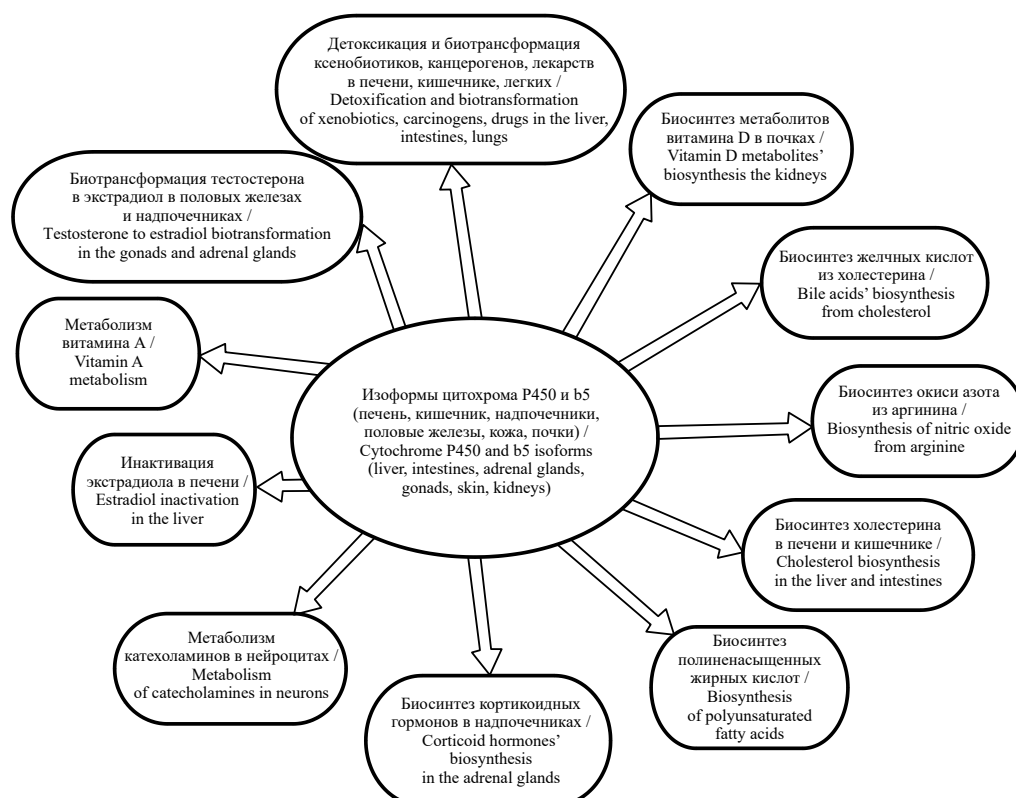


Рис. 1. Роль цитохрома P450 в организме /
Fig. 1. The role of cytochrome P450 in the organism

Стоит отметить, что молекула ксенобиотика или лекарственного вещества на первом этапе детоксикации теряет способность растворяться в липидах, что означает возможность частичной элиминации чужеродного соединения из организма через жидкие среды – с мочой, потом, секретом слезных и слюнных желез [8, 17, 18, 19]. Присоединение к продукту реакций первой фазы некоторых эндогенных веществ (например, конъюгация с ацетатом, сульфатом, глюкуроновой кислотой, глюта-

тионом) усиливает интенсивность процессов экскреции. В этом заключается сущность второй фазы биотрансформации ксенобиотика [14]. Ферментами, участвующими в обеспечении процесса конъюгации промежуточных метаболитов, являются метилтрансферазы, сульфотрансферазы, глутатион-S-трансферазы и некоторые другие (табл. 1) [15, 20]. Указанные энзимы обладают низкой субстратной специфичностью, поэтому достаточно активны в отношении многих видов химических соединений.

Таблица 1 – Ферменты второй фазы обезвреживания ксенобиотиков [15, 20] /
Table 1 – Enzymes of the second phase of xenobiotic neutralization [15, 20]

Фермент / Enzyme	Метаболит, используемый для конъюгации / Metabolite used for conjugation	Активная форма метаболита / Active form of metabolite
Ацетилтрансфераза / Acetyltransferase	Ацетат / Acetate	Ацетил КоА / Acetyl CoA
УДФ-глюкуронилтрансфераза / UDP-glucuronyltransferase	Глюкуронат / Glucuronate	УДФ-глюкуронат / UDP-glucuronate
Метилтрансфераза / Methyltransferase	Метил / Methyl	SAM
Сульфотрансфераза / Sulfotransferase	Сульфат / Sulfate	ФАФС-3'-фосфоаденозин-5'-фосфосульфата / FAFS-3'-phosphoadenosine-5'-phosphosulfate
Глутатионтрансфераза / Glutathione transferase	Глутатион (GSH) / Glutathione (GSH)	Глутатион (GSH) / Glutathione (GSH)

Третий этап процесса детоксикации представляет собой АТФ-зависимое выведение и транспортировку через легкие, желудочно-кишечный тракт, печень конъюгированных продуктов биотрансформации ксенобиотиков

и лекарственных веществ посредством систем активного транспорта, преимущественно семейством трансмембранных Р-гликопротеинов [15]. Обобщенная схема процесса биотрансформации представлена на рисунке 2.

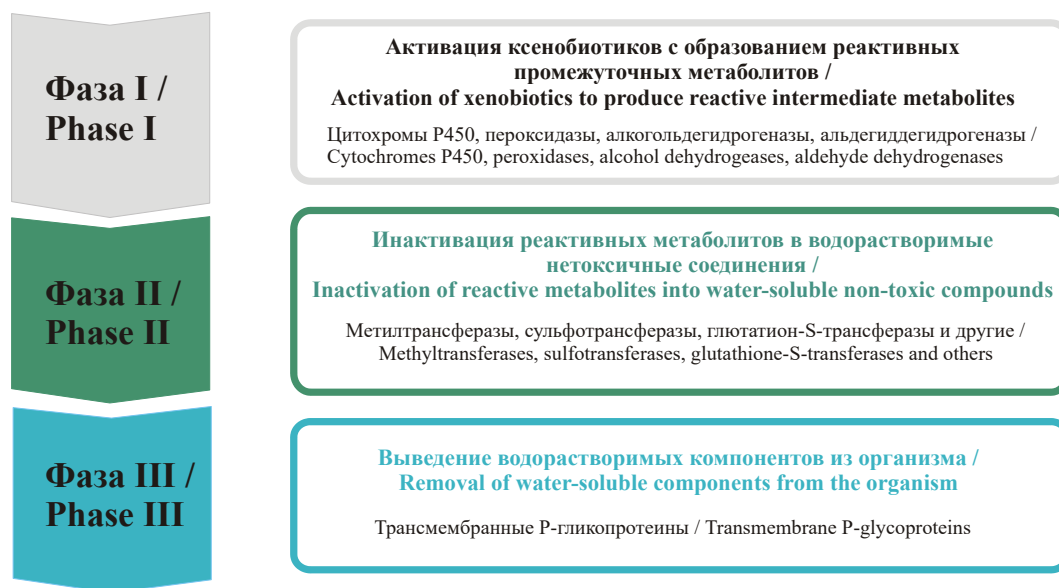


Рис. 2. Схема процесса биотрансформации ксенобиотиков с указанием ферментов-участников каждого этапа /

Fig. 2. Scheme of the xenobiotics biotransformation including enzymes needed for each stage

Детоксикационные ферментные системы. Ферментные системы, обеспечивающие процесс детоксикации организма, имеют ряд общих свойств: 1) низкая субстратная специфичность – это позволяет ферментам данной группы метаболизировать различные по структуре химические вещества³ [21, 22]; 2) выраженный полиморфизм – появление множества изоформ ферментов объясняется, в первую очередь, адаптацией животного к климатическим и экологическим условиям, а также к особенностям кормления [4, 23, 24]; 3) все ферменты, участвующие в процессе биотрансформации ксенобиотиков, являются индуцибельными – иными словами, синтез фермента невозможен (подавлен) до тех пор, пока на клетку не подействует специфический индуктор, который зачастую по своей природе является субстратом [5, 25, 26]; 4) наивысшего эффекта система детоксикации достигает тогда, когда происходит сопряженное взаимодействие ферментов первого и второго этапов [14, 27, 28]. Накопление высокотоксичных реактивных метаболитов вследствие десинхронизации фаз

биотрансформации или сочетания изоферментов, приводящих к их взаимной инактивации, приводит к быстрой интоксикации организма. [29, 30] Особенно неблагоприятной комбинацией является высокая функциональная активность ферментных систем первого этапа при одновременно низкой активности ферментов второго этапа детоксикации, поскольку при чрезмерно интенсивном образовании первичных реактивных метаболитов большая их часть не «утилизируется» процессами конъюгации [31, 32, 33, 34]. Необходимо учитывать, что цикл биотрансформации ксенобиотиков и лекарственных средств в живом организме должен быть полным, завершенным. В противном случае, когда цикл прерывается по различным причинам (инактивирующее взаимодействие изоформ ферментов, отсутствие сопряжения между системами первой и второй фаз процесса детоксикации, расстройство обмена веществ в клетке и др.), следует ожидать обратного эффекта – усиление токсического действия активированных метаболитов ксенобиотиков или лекарственных веществ⁴ [4].

³Вергейчик Т.Х. Указ. соч.

⁴Там же.

На основании представленной ранее информации очевидно, что пусковым звеном в процессе ферментативной детоксикации является действие ряда ферментов, в числе которых семейство цитохромов. Цитохромы, в общем их понимании, – это группа белков, которые содержат в своем составе в качестве кофактора гем и обладают свойством принимать и отдавать электроны за счет изменения валентности центрального атома железа в геме. Кофактор в этой группе энзимов может находиться в восстановленной (ферро) или окисленной (ферри) формах⁵. Семейство цитохромов P450 является особым классом данного ряда ферментов, поскольку его восстановленная форма имеет спектр поглощения, не типичный для большинства цитохромов. Также цитохромы P450 имеют высокое сродство с монооксидом углерода (CO)⁶. В отдельных тканях присутствует несколько различных изоформ цитохромов P450. Эту группу ферментов зачастую называют также оксидазами со смешанной функцией (ОСФ) по причине достаточно низкой субстратной специфичности и способности метаболизировать различные типы химических соединений. Субстратом для цитохромов P450 служат как простые молекулы (например,

хлороформ, стероиды), так и сложные гетероциклические соединения (например, антибиотик циклоспорин). Эти ферменты способны катализировать не только окисление, но и восстановление некоторых веществ, например, четыреххлористого углерода и некоторых других галогенсодержащих углеводородов с образованием свободных радикалов⁷. Однако для реализации подобных реакций необходимо наличие условия пониженного парциального давления кислорода в тканях. Также стоит отметить, что ферменты семейства цитохромов P450 обеспечивают метаболизм около ¾ всех поступающих в организм лекарственных средств, причем некоторые препараты под действием этих энзимов переходят в активную функциональную форму [1, 8].

Моноксигеназные комплексы. Локализация микросомального моноксигеназного комплекса (в состав которого входит семейство цитохромов P450) в липидном бислое эндоплазматического ретикулама представлена на рисунке 3 [4]. Ферменты СYP закреплены в мембране N-концами, а активные центры энзимов, расположенные ближе к С-концам, экспонированы в цитозольный компартмент.

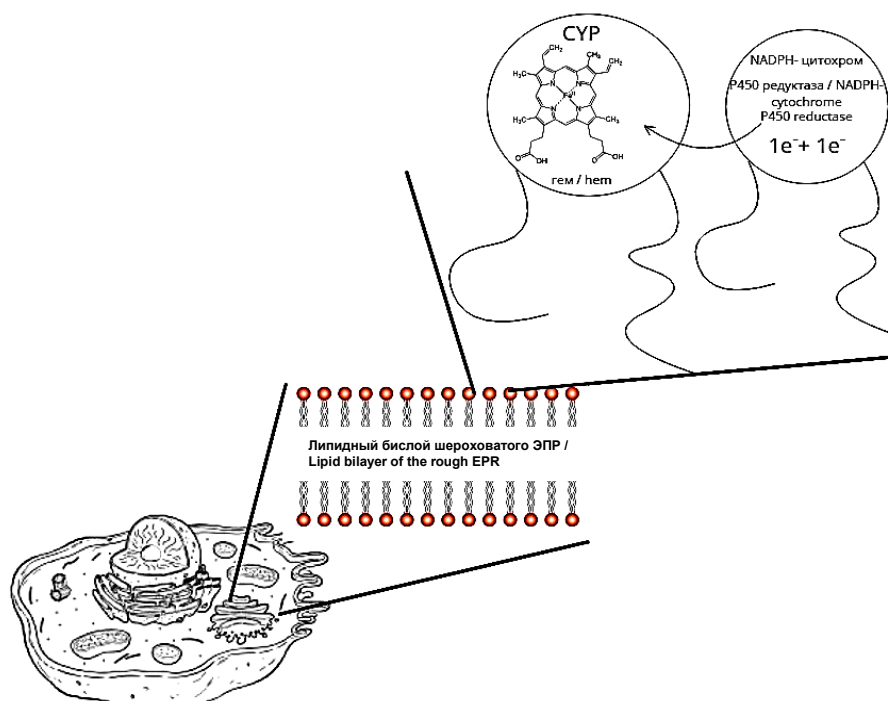


Рис. 3. Расположение моноксигеназной системы в клетке /
Fig. 3. Monooxygenase system location inside cell

⁵Нельсон Д., Кокс М. Указ. соч.

⁶Там же.

⁷Там же.

Взаимосвязь между локальной (клеточной) концентрацией ксенобиотиков, сродством к специфическим ферментам, тканеспецифической экспрессией ферментов, стабильностью и доступностью кофакторов зачастую определяет тип преобладающих метаболических реакций у данного индивидуума в конкретный момент [18, 24, 28].

Реакцию субстратной биотрансформации запускает процесс связывания молекул субстрата с цитохромом семейства P450. Молекула ксенобиотика/лекарственного вещества способна взаимодействовать как с белковой частью цитохрома P450, так и непосредственно с ионом железа геминного компонента фермента. Первостепенная роль в начальном звене биотрансформации принадлежит цитохромам P450 1A1 (CYP1A1), 1A2 (CYP1A2), 1B1 (CYP1B1) [14, 15, 35]. Цитохром P450 1A1 принимает участие в монооксигеназной активации полициклических ароматических углеводородов и гетероциклических аминов, результатом которой является образование промежуточных токсических метаболитов – эпоксидов, фенолов⁸. Кроме того, CYP1A1 обеспечивает метаболизм эстрогенов, осуществляя акти-

вацию эстрадиола, а также метаболизм никотина, кофеина, теофиллина, микотоксинов, флавоноидов. Цитохром P450 1A2 активирует преимущественно ароматические и гетероциклические амины посредством N-гидроксилирования, а также участвует в превращении полициклических ароматических углеводородов, нитрозаминов и афлатоксина B1 в продукты, обладающие цитотоксическими и канцерогенными свойствами. Цитохром P450 1B1 обеспечивает превращения холестерина, стероидов и липидов⁹ [14, 15, 36, 37].

Реакции окисления посредством микросомальных компонентов катализируются NADPH- и NADH-зависимыми ферментными системами в присутствии кислорода (рис. 4)¹⁰. NADPH-зависимый флавопротеин переносит электрон от восстановленного NADPH на цитохром P450. В монооксигеназных реакциях также участвует NADH-зависимый ферментный комплекс, представленный NADH-зависимым флавопротеином и цитохромом b₅. Электрон с цитохрома b₅ может переноситься или на кислород с его последующей активацией, или на цитохром P450, восстанавливая ион железа в геме¹¹.

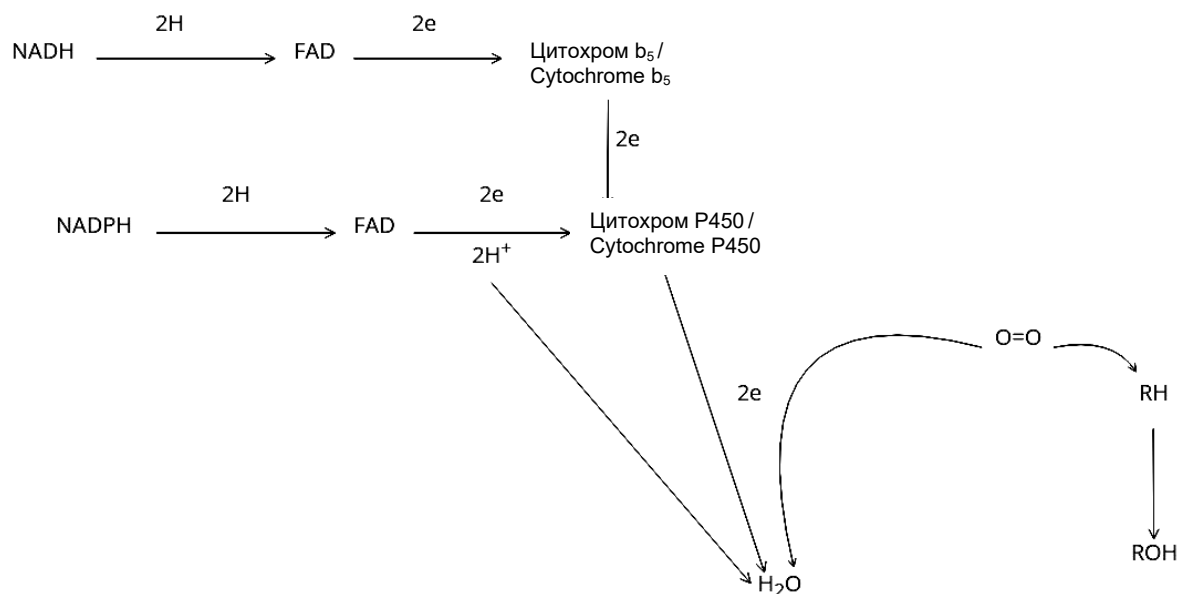


Рис. 4. Схема монооксигеназных реакций, осуществляемых посредством цитохромов /
Fig. 4. Scheme of monooxygenase reactions carried out by cytochromes

⁸Нельсон Д., Кокс М. Указ. соч.

⁹Там же.

¹⁰Там же.

¹¹Там же.

Биохимические реакции, катализируемые цитохромами P450, достаточно разнообразны по своей природе. К числу наиболее распространенных реакций превращения ксенобиотиков и лекарственных средств относится окислительное деалкилирование, сопровождающееся окислением алкильной группы, присоединённой к атомам N, O или S (рис. 5)¹² [8]. Этот процесс происходит в эндоплазматическом ретикулуме (ЭПР) гепатоцитов. Деалкилирование с окислением алкильной группы является основным способом метаболизма вторичных и третичных аминов и особенно детально изучено у наркотических средств и анальгетиков. Например, в печени таким образом преобразуются кодеин, колхицин, папаверин; в результате подобного деметилирования из кодеина

образуется морфин, на чем и основан обезболивающий эффект кодеина [1, 4, 38].

Другой часто встречающийся тип реакций, катализируемых цитохромами P450, – гидроксилирование циклических соединений (ароматических, предельных и гетероциклических углеводородов). Ферменты семейства P450 способны осуществлять реакции окислительного дезаминирования, а также реакции восстановления нитросоединений¹³ [39]. В процессе окислительного дезаминирования происходит отщепление аминогруппы чаще всего от лекарственных препаратов, что, в свою очередь, обычно приводит к потере фармакологического эффекта: например, в микросомах печени амфетамин теряет аминогруппу с образованием фенилацетона (рис. 6) [1, 40].

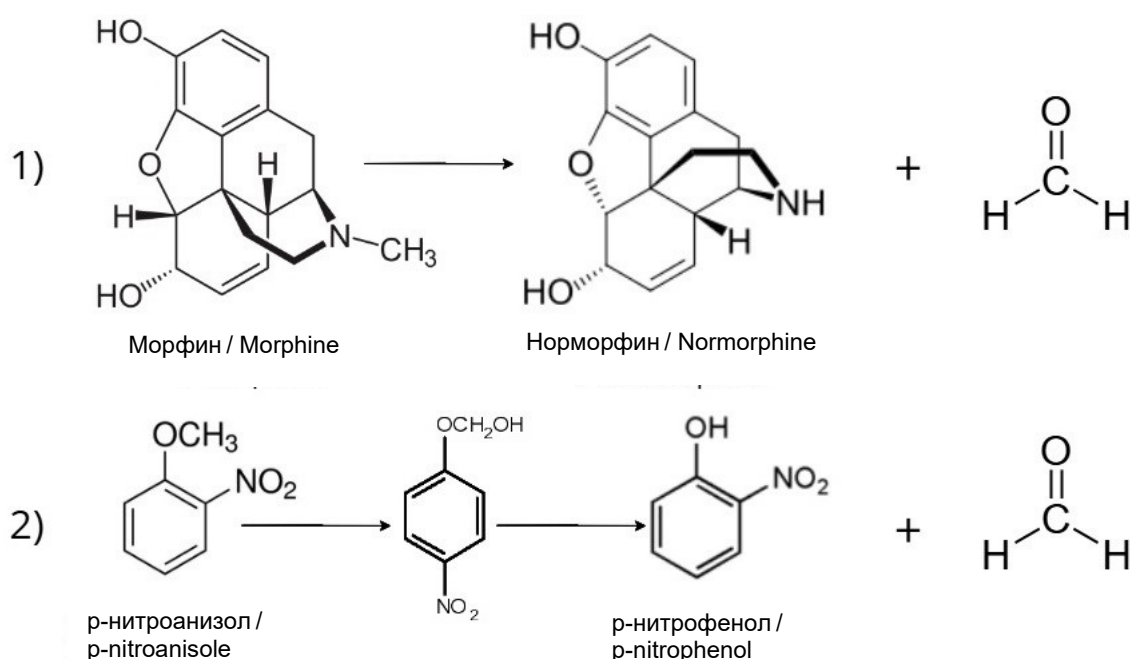


Рис. 5. Примеры окислительного деалкилирования по азоту (1) и кислороду (2) /

Fig. 5. Examples of oxidative dealkylation by nitrogen (1) and oxygen (2)

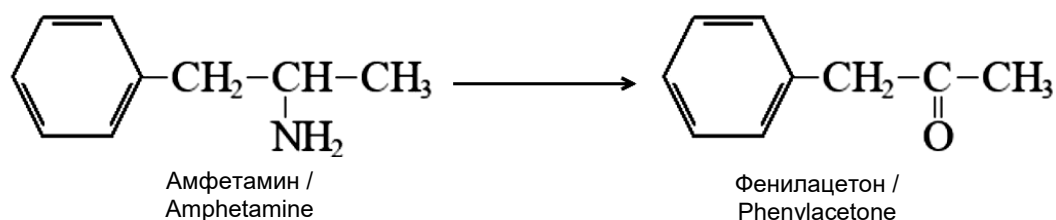


Рис. 6. Окислительное дезаминирование амфетамина в гепатоцитах /

Fig. 6. Oxidative deamination of amphetamine in hepatocytes

¹²Нельсон Д., Кокс М. Указ. соч.

¹³Там же.

Реакции восстановления нитросоединений (например, левомицетина) и азотсодержащих соединений (например, азотных красителей) протекают в эндоплазматическом ретикуле в присутствии, помимо цитохромов P450, NADPH-зависимого флавопротеина¹⁴. Кроме того, в указанных реакциях могут

принимать активное участие и другие типы ферментов. Так, например, восстановление нитробензола в анилин (рис. 7) осуществляется микросомальной NADH-зависимой системой, представляющей собой флавопротеин с FAD в качестве простетической группы [41, 42, 43, 44].

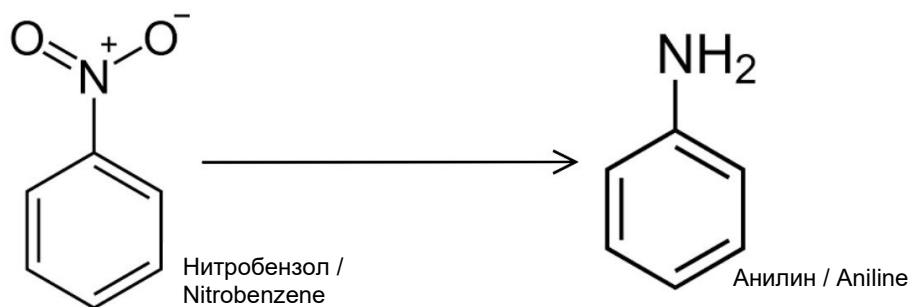


Рис. 7. Восстановление нитрогруппы нитробензола до аминогруппы /
 Fig. 7. Reduction of the nitrobenzene nitro group to an amino group

Помимо представленных выше реакций цитохромы семейства P450 способны осуществлять десульфирование некоторых соединений, в том числе и лекарственных средств.

Десульфирование представляет собой процесс замещения серы в молекуле кислородом. Пример такого превращения – десульфирование тиобарбитала до барбитала (рис. 8)¹⁵ [8].

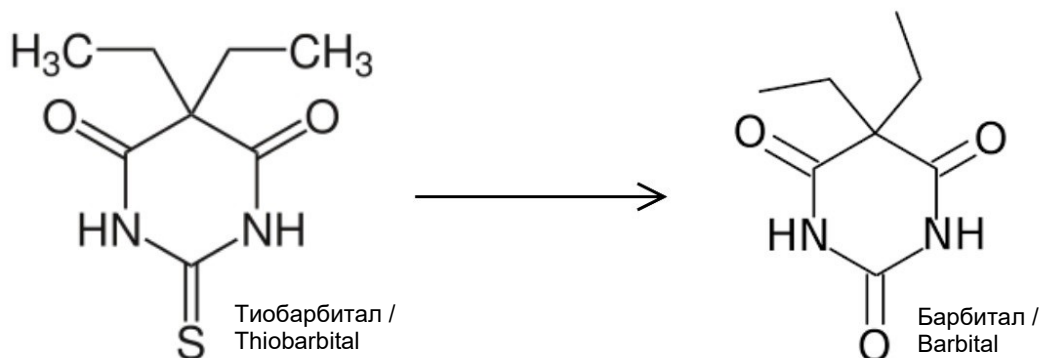


Рис. 8. Десульфирование тиобарбитала до барбитала /
 Fig. 8. Desulfurization of thiobarbital to barbital

Цитохромы P450 также катализируют реакции омега-окисления насыщенных жирных кислот, перекисного окисления ненасыщенных жирных кислот, гидроксилирования стероидных гормонов, желчных кислот и холестерина, процесс биосинтеза простагландинов и витамина D [14, 45, 46, 47].

Функциональное значение цитохромов. Функциональное значение цитохромов P450 в процессе биотрансформации ксенобиотиков и лекарственных средств на этапе развития современной биохимии и физиологии млеко-

питающих находится в стадии активного исследования. Функции некоторых наиболее изученных типов ферментов данной ферментной системы представлены в таблице 2¹⁶ [17].

Стоит отметить, что существует определенная вариабельность в метаболизме ксенобиотиков и лекарственных средств среди представителей млекопитающих. При проведении токсикологических экспериментов неоднократно были зафиксированы различия в профилях мутагенности химических веществ у различных видов [16, 18, 19, 21, 48, 49, 50].

¹⁴Нельсон Д., Кокс М. Указ. соч.

¹⁵Вергейчик Т.Х. Указ. соч.

¹⁶Нельсон Д., Кокс М. Указ. соч.

Таблица 2 – Основные классы соединений, метаболизируемых изоферментами CYP /
Table 2 – Main classes of compounds metabolized by CYP isoenzymes

Класс соединений / Classe of compounds	Изоферменты CYP / CYP isoenzymes
Ксенобиотики / Xenobiotics	1A1, 1A2, 2A6, 2A13, 2B6, 2C8, 2C9, 2C18, 2C19, 2D6, 2E1, 2F1, 3A4, 3A5, 3A7
Стерины / Sterols	1B1, 7A1, 7B1, 8B1, 11A1, 11B1, 11B2, 17A1, 19A1, 21A2, 27A1, 39A1, 46A1, 51A1
Эйкозаноиды / Eicosanoids	4F2, 4F3, 4F8, 5A1, 8A1
Жирные кислоты / Fatty acids	2J2, 2U1, 4A11, 4B1, 4F11, 4F12, 4F22, 4V2, 4X1, 4Z1
Витамины / Vitamins	2R1, 24A1, 26A1, 26B1, 26C1, 27B1, 27C1
Не установлено / Not established	2A7, 2S1, 2W1, 4A22, 20A1

Наглядным примером межвидовых особенностей процесса детоксикации служит разработка в 50-х гг. прошлого века препарата талидомид, применявшегося как снотворное и противорвотное средство для лечения тошноты у беременных женщин, не вызывающее привыкания и не содержащее барбитуратов [51]. Данный препарат успешно прошел тестирование на потенциальную тератогенность на лабораторных мышах и считался абсолютно

безопасным. Однако его применение влекло за собой возникновение множества врожденных дефектов, в особенности пороков развития конечностей [17, 21]. Выяснилось, что причиной тератогенного эффекта препарата являлся реакционноспособный метаболит талидомида – ареноксид (рис. 9), который образуется посредством системы цитохромов P450 в значительно более высоких концентрациях в печени человека и кролика, чем в печени мыши [17].

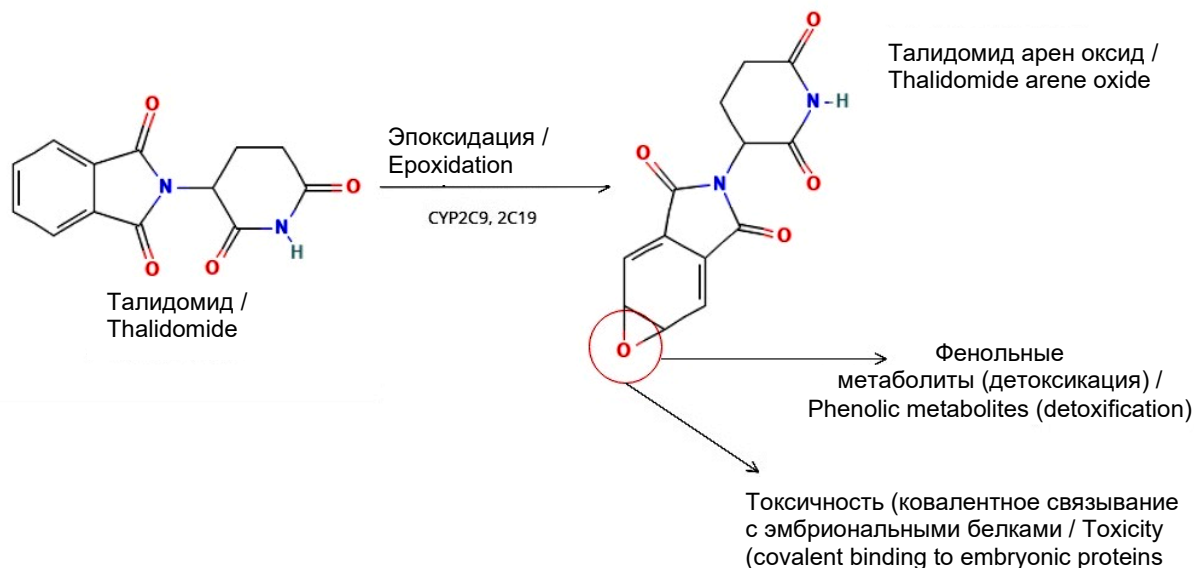


Рис. 9. Биоактивация препарата талидомид, опосредованная цитохромами P450 [14] /

Fig. 9. Bioactivation of thalidomide mediated by cytochromes P450 [14]

Еще один яркий пример – особенность метаболизма афлатоксина В₁ у форели [52, 53, 54]. Афлатоксин В₁ является мощнейшим канцерогеном химической природы, поражающим, первую очередь, клетки печени. Данное соединение активируется посредством CYP-

зависимой реакции (рис. 10) [17]. Воздействие афлатоксина на форель инициирует развитие у рыбы гепатоцеллюлярной карциномы, имеющей большое сходство с таковой у человека, в то время как у мышей не наблюдается подобного канцерогенного эффекта [17, 21].

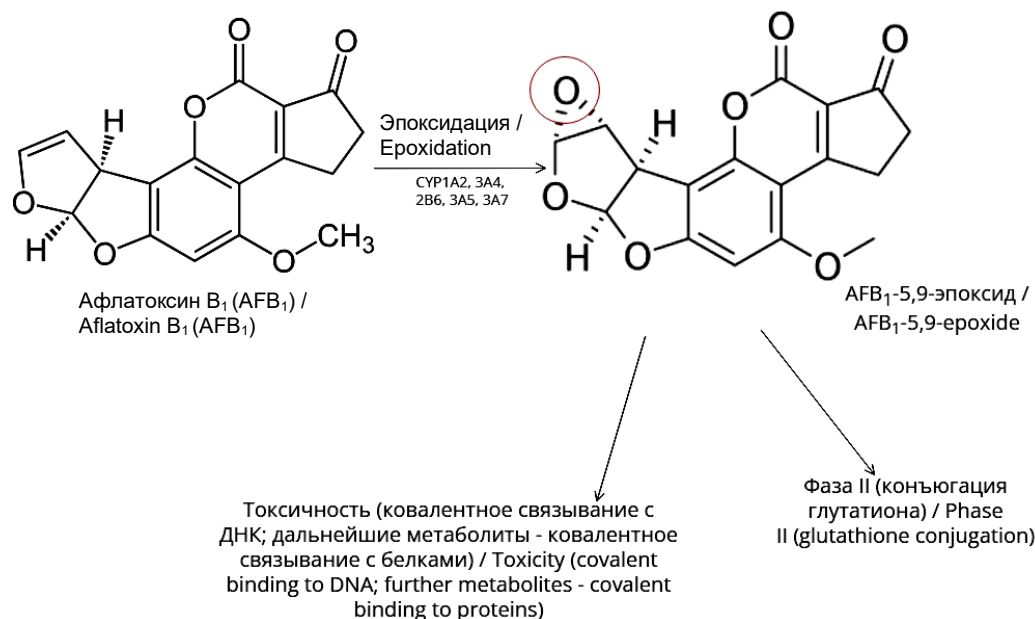


Рис. 10. Биоактивация афлатоксина В₁ ферментами системы СYP /
Fig. 10. Bioactivation of aflatoxin B₁ by CYP enzymes

Системы цитохромов разных видов животных. Особый интерес, прежде всего для деятелей в сфере экологии и охраны окружающей среды, представляет изучение набора цитохромов семейства P450 у водных моллюсков [53, 54]. В связи с аккумуляцией в гидросфере большого количества ксенобиотиков различного происхождения фильтрующие моллюски, с одной стороны, способны накапливать эти соединения в тканях и тем самым снижать свою потребительскую ценность, однако, с другой стороны, моллюски могут выступать в роли биологических индикаторов загрязнения водоема при использовании методов определения изменений ферментативной активности или экспрессии генов комплекса детоксикации [15, 37]. Такой биологический способ индикации, основанный на модели моллюсков, является достаточно информативным и эффективным в рамках токсикологических исследований по двум причинам: 1) возможность оценки интегрального (накопительного) эффекта на компоненты водных биоценозов; 2) учет общей совокупности токсичных поллютантов (включая неидентифицированные на данный момент времени химические соединения) [15]. Генетический аспект системы цитохромов P450 у моллюсков изучен, к сожалению, недостаточно. Известно, что тихоокеанская устрица содержит 39 генов СYP, калифорнийская мидия – 58, брюхоногий моллюск лоттия гигантская – 68, китайский

гребешок – 88. У моллюсков были выявлены следующие СYP-семейства: 1-5, 10-11, 17, 20, 24, 26-27, 30, 35 [26, 31]. Преимущество знания нуклеотидных последовательностей генов СYP у моллюсков состоит прежде всего в возможности разработки специфических тест-систем для количественного определения уровня их экспрессии, что необходимо для изучения регуляции системы цитохромов P450 и разрешения экологических задач [15].

Системы цитохромов P450 у млекопитающих характеризуются избирательной локализацией на основных путях поступления ксенобиотиков и лекарственных средств в организм – в легких и желудочно-кишечном тракте (в особенности в тонком кишечнике и печени [14, 17, 25, 49]). Энзимы СYP обеспечивают подавляющее большинство (около 90–95 % [17]) ферментативных реакций в ходе биотрансформации ксенобиотиков. Около 15 изоформ, относящихся к семействам СYP 1, 2 и 3, ответственны за 70–80 % реакций фазы I биотрансформации клинически используемых лекарственных средств; также они участвуют в метаболизме огромного количества химических соединений окружающей среды, включая 66 % всех реакций метаболизма канцерогенов химической природы. Из них СYP 1A2, СYP 2C9, СYP 2D6 и СYP 3A4 играют первостепенную роль в 72 % всех СYP-опосредованных превращений лекарственных препаратов, реализуемых в повседневной клинической практике.

Представители семейства CYP 4 (CYP 4A11, CYP 4F2 и CYP 4F12) активно участвуют в метаболизме ксенобиотиков, но в значительно меньшей степени, чем изоформы семейств CYP 1, 2, 3 [16, 17].

Специфические варианты генов, кодирующих системы цитохромов P450, обуславливают четыре основных метаболических фенотипа: 1) ультрабыстрые метаболизаторы (UM), включающие две или более активных копий генов, кодирующих сверхэкспрессированные изоформы CYP; 2) экстенсивные метаболизаторы (EM); 3) промежуточные метаболизаторы (IM), гетерозиготные по дефектному признаку – носители двух аллелей, вызывающих сочетанное снижение активности CYP; 4) плохие метаболизаторы (PM), гомозиготные по двум дефектным аллелям, продуцирующие CYP с очень низкой активностью или без нее [17]. Некоторые исследования показали [17], что такие факторы, как возраст, пол, гормональный статус организма, элементы окружающей среды, патологические состояния оказывают влияние на степень экспрессии и активности генов, кодирующих систему цитохромов P450. Так, отдельные типы цитокинов, например, интерлейкины ИЛ-1 β , ИЛ-2, ИЛ-4, ИЛ-6, ИЛ-10 и ИЛ-23, гамма-интерферон, фактор некроза опухоли, а также некоторые липополисахариды способны прямо или косвенно модулировать экспрессию генов CYP [8, 21, 22, 23, 24, 25, 26].

В экспериментах, целью которых являлся сравнительный анализ функциональной активности системы цитохромов P450 у различных видов млекопитающих, было показано, что каталитическая способность ферментов CYP 2E1, CYP 1A2, CYP 2D и CYP 3A постоянна среди исследованных видов, однако экстраполяция активностей CYP 2A, CYP 2B и CYP 2C имеет определенные различия [6, 18]. Стоит отметить, что гены, кодирующие ферменты системы цитохромов P450 у животных, имеют до 80 % сходства (гомологии) в последовательности с соответствующими генами у человека¹⁷ [6, 7, 8, 9]. Несмотря на данный факт, цитохромы могут обладать различным сродством к субстрату, иными механизмами ингибирования, иметь особенности в степени экспрессии и кинетике энзимов, что и обуславливает межвидовую вариабельность процесса биотрансформации ксенобиотиков, а также фармакокинетики и фармакодинамики лекарственных

средств у животных и человека. Получение детальной информации по цитохромам семейства P450 у животных (прежде всего лабораторных), с точки зрения медицины человека, необходимо для объективной оценки значимости моделей *in vivo* в доклинических исследованиях и подбора оптимальной тест-системы в каждом отдельном случае [32, 33, 34, 35, 36, 37].

В исследовательской работе М. В. Мирошникова [и других соавторов] наиболее подробно рассматриваются типы цитохромов P450 у мышей, крыс, кроликов, кошек, собак, свиней, морских свинок и приматов в сравнительном аспекте с ферментными системами человека [6]. Результирующие данные этой работы позволяют точнее определять прогностическую ценность животных для изучения особенностей метаболизма токсических веществ и лекарственных субстанций, находящихся на стадии разработки [24]. Так, например, общее содержание ферментов CYP в печени у крыс примерно в два раза выше, чем у человека [6], соответственно с большей долей вероятности биотрансформация ксенобиотиков у данных животных будет происходить значительно интенсивнее. Или, например, фурациллин, являющийся мощнейшим ингибитором фермента CYP 1A у человека, не оказывает блокирующего влияния на данный энзим у кошек. Также ингибиторы цитохромов включают кетоконазол, который подавляет активность CYP3A4 и может увеличивать уровень других лекарственных препаратов в крови, вызывая риск токсичности. Другие ингибиторы, такие как ритонавир и циметидин также могут влиять на метаболизм при одновременном применении. Среди индукторов стоит отметить рифампицин, который активирует CYP3A4, ускоряя метаболизм некоторых препаратов и снижая их эффективность. Также к индуктору можно отнести карбамазепин, который зачастую используется для лечения эпилепсии и может снижать концентрацию антитабачных средств.

Кроме того, CYP 1A кошек проявляет гораздо большую функциональную активность по сравнению с аналогичным цитохромом у собак и человека – метаболизм производных кумарина у кошек ферментом CYP 1A2 осуществляется приблизительно в семь раз эффективнее. Однако превращение кломипрамина (препарат группы антидепрессантов) посредством CYP 2 у кошек происходит значительно медленнее, чем у собак, крыс и человека.

¹⁷Нельсон Д., Кокс М. Указ. соч.

Также ферментные системы кошек не обладают способностью гидроксилирования толбутамида, хотя такую активность проявляет CYP 2C9 у человека. У собак процессы биотрансформации кумарина и р-гидроксилирования анилина, опосредуемые различными типами цитохромов, занимают в 2 раза больше времени, чем у человека [6]. Мини-пиги, в свою очередь, являются обладателями наивысшей концентрации цитохромов P450, из часто используемых в лаборатории животных. Помимо этого, в ферментных системах животных была отмечена следующая особенность: у самок млекопитающих активность цитохромов P450 всегда превышала таковую у самцов, в то время как у человека данная закономерность имеет прямо противоположный смысл [6].

Широкий диапазон генетической изменчивости, являющийся причиной межвидовых различий в экспрессии и активности у животных, в некоторых случаях опосредует недостаточный терапевтический эффект применения лекарственных препаратов, а также высокую степень интоксикации организма при воздействии различных химических факторов внешней среды. Фармакогенетическое тестирование ферментной системы CYP в медицине человека стало достаточно перспективным направлением в связи с возможностью разработки более безопасных лекарств и индивидуальной фармакологической терапии. На мой взгляд, область ветеринарной медицины в глобальном ее понимании также нуждается в подобных нововведениях и корректировках существующих схем применения лекарственных средств для каждого вида животного с учетом индивидуального уровня экспрессии и функциональной активности ферментов системы CYP.

Заключение. В последние десятилетия исследование влияния различных препаратов на печень стало важным направлением в фармакологии и токсикологии [55, 56, 57, 58]. Печень, как главный орган метаболизма и детоксикации, подвержена воздействию множества химических веществ. Для создания адекватных моделей, позволяющих оценить степень этого

влияния, необходимо рассматривать как экспериментальные, так и клинические данные.

Фармакокинетические модели (модели на основе клиренса кофеина и сорбиола; оценка фармакокинетических параметров Gd-EOB-DTPA и пр.) [59, 60] играют ключевую роль в оценке состояния печени, обеспечивая понимание процессов абсорбции, распределения, метаболизма и выведения лекарственных веществ. Эти модели помогают предсказывать, как различные факторы – от состояния здоровья животного до характеристик самого препарата – могут влиять на фармакокинетику. Например, изменения в кровотоке печени или функциональной активности ферментов могут существенно изменить фармакокинетические параметры, что требует корректировки дозировок для достижения терапевтического эффекта.

Современные подходы к моделированию, включая структурные и физиологические модели печени, позволяют более точно оценивать взаимодействие лекарств с печеночной тканью. Комбинирование этих моделей с данными клинических исследований повышает прогнозируемость и безопасность лечения. Одной из подобных моделей является оценка активности семейства цитохромов и активирующих их ферментов.

Цитохромы семейства P450 являются инициаторами процесса биотрансформации ксенобиотиков и лекарственных средств у млекопитающих, поэтому играют первостепенную роль в превращении и стимуляции последующей экскреции чужеродных метаболитов. Данные ферментные системы включают десятки различных типов энзимов, имеющих определенный спектр экспрессии и метаболической активности у разных видов животных, что напрямую обуславливает особенности процесса детоксикации, а также фармакокинетики и фармакодинамики лекарственных средств. Исследовательская деятельность по изучению цитохромов семейства P450 у животных имеет статус перспективного направления в сфере клинической фармакологии и ветеринарной токсикологии.

Список литературы

1. Абрамян А. С., Макарова Л. М., Погорелый В. Е. К вопросу межвидового различия системы цитохрома P450 при проведении доклинических исследований лекарственных средств. Современные проблемы естественных наук и фармации: сб. ст. Всеросс. научн. конф. Йошкар-Ола: Марийский ГУ, 2023. С. 311–314. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54627907&pff=1> EDN: UNKGLC
2. Горина С. С., Топоркова Я. Ю. Сравнительный анализ гемопротеинов (P450 и каталаз), участвующих в биосинтезе оксипинов растений и животных. Новые технологии в медицине, биологии, фармакологии и экологии: мат-лы Междунар. конф. NT + M&Ec' 2020. Весенняя сессия. Москва, 2021. М.: Институт новых информационных технологий, 2021. С. 274–279. DOI: <https://doi.org/10.47501/978-5-6044060-1-4.48> EDN: CTDMTW

3. Королёва Е. С., Понамарёв В. С. Влияние препарата «Гепатон» на показатель цитохрома P450. Экология и природопользование: мат-лы Международн. научн.-практ. конф. Назрань – Кантышево: ООО «КЕП», 2020. С. 131–133.
4. Латыпова Э. А., Шишкина Т. В., Камбунова В. С. Анализ воздействия экотоксикантов окружающей среды на ферменты и гены системы метаболизма ксенобиотиков млекопитающих. Национальное здоровье. 2021;(2):52–55.
5. Манджиева А. А., Лукина П. А., Вечкинов Р. С., Аветисова И. В. Методы изучения механизмов биотрансформации ксенобиотиков *in vitro*. Студенческий научный форум: мат-лы международн. студен. научн. конф. Саратов: ООО «Евразийская научно-промышленная палата», 2021. Т. VIII. С. 22–23. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45678037> EDN: JLSMFL
6. Мирошников М. В., Султанова К. Т., Макарова М. Н., Макаров В. Г. Сравнительный обзор активности ферментов системы цитохрома P450 человека и лабораторных животных. Прогностическая ценность доклинических моделей *in vivo*. Трансляционная медицина. 2022;9(5):44–77. DOI: <https://doi.org/10.18705/2311-4495-2022-9-5-44-77> EDN: IZGDRT
7. Попова О. С., Понамарев В. С., Кострова А. В., Агафонова Л. А. Фармакокинетические параметры кофеина у лабораторных животных в контексте оценки функционального состояния печени. Международный вестник ветеринарии. 2023;(2):142–149. DOI: <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2023.2.142> EDN: UAXPQW
8. Рембовский В. Р., Могилёвская Л. А. Процессы детоксикации при воздействии химических веществ на организм. СПб: изд-во Политехнического у-та, 2017. 384 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38561435> EDN: ZDCTCR
9. Смирнов Л. П., Суховская И. В., Борвинская Е. В. Этоксирезорифин о-деэтилаза - систематическая принадлежность и функциональные особенности как фермента фазы I биотрансформации ксенобиотиков (обзор). Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2015;(4):18–21. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25069573> EDN: VCPNRL
10. Zemanova N., Anzenbacher P., Anzenbacherova E. The role of cytochromes P450 in the metabolism of selected antidepressants and anxiolytics under psychological stress. Biomedical papers of the Medical Faculty of the University Palacky, Olomouc, Czech Republic. 2022;166(2):140–149. DOI: <https://doi.org/10.5507/bp.2022.019>
11. Dekant W. The role of biotransformation and bioactivation in toxicity. Molecular, Clinical and Environmental Toxicology. 2009;99:57–86. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8336-7_3
12. Jackson K. D., Durandis R., Vergne M. J. Role of Cytochrome P450 Enzymes in the Metabolic Activation of Tyrosine Kinase Inhibitors. International journal of molecular sciences. 2018;19(8):2367. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms19082367>
13. Файнгор А. И., Силицына Н. И., Воробьев А. Н., Абрамович Р. А., Потанина О. Г. Введение красителя при разработке тест-системы для фенотипирования изоферментов цитохрома P450. Гармонизация подходов к фармацевтической разработке: сб. тез. III Международ. научн.-практ. конф. М.: Российский у-т дружбы народов (РУДН), 2020. С. 4–6. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44818800> EDN: DDHSJU
14. Полякова И. С., Чурносков М. И., Пахомов С. П., Орлова В. С. Молекулярные и генетические механизмы биотрансформации ксенобиотиков. Актуальные проблемы медицины. 2011;(16(111)):223–228. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19403719> EDN: QIPXGV
15. Manikandan P., Nagini S. Cytochrome P450 Structure, Function and Clinical Significance: A Review. Current Drug Targets. 2018;19(1):38–54. DOI: <https://doi.org/10.2174/1389450118666170125144557>
16. Щелканов Е. М., Тишина Е. А., Мануков Ю. И., Сапрыкин В. П. Биотрансформация ксенобиотиков моллюсками (*Mollusca* L., 1758) – индикаторами состояния водных экосистем. Географическая среда и живые системы. 2024;(1):154–173. DOI: <https://doi.org/10.18384/2712-7621-2024-1-154-181> EDN: DNAIWP
17. Bogaards J. J., Bertrand M., Jackson P., Oudshoorn M. J., Weaver R. J., van Bladeren P. J., Walther B. Determining the best animal model for human cytochrome P450 activities: a comparison of mouse, rat, rabbit, dog, micropig, monkey and man. Xenobiotica. 2000;30(12):1131–1152. DOI: <https://doi.org/10.1080/00498250010021684>
18. Esteves F., Rueff J., Kranendonk M. The Central Role of Cytochrome P450 in Xenobiotic Metabolism-A Brief Review on a Fascinating Enzyme Family. Journal of Xenobiotics. 2021;11(3):94–114. DOI: <https://doi.org/10.3390/jox11030007>
19. Finnigan J. D., Young C., Cook D. J., Charnock S. J., Black G. W. Cytochromes P450 (P450s): A review of the class system with a focus on prokaryotic P450s. Advances in Protein Chemistry and Structural Biology. 2020;122:289–320. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.apcsb.2020.06.005>
20. Reed L., Arlt V. M., Phillips D. H. The role of cytochrome P450 enzymes in carcinogen activation and detoxication: an *in vivo-in vitro* paradox. Carcinogenesis. 2018;39(7):851–859. DOI: <https://doi.org/10.1093/carcin/bgy058>
21. Oesch F., Fabian E., Guth K., Landsiedel R. Xenobiotic-metabolizing enzymes in the skin of rat, mouse, pig, guinea pig, man, and in human skin models. Archives of Toxicology. 2014;88(12):2135–2190. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-014-1382-8>

22. Tuychieva D., Alimova R., Mirkhamidova P. Content of cytochrome P-450 in microsomal fractions of the liver of pregnant rats and their embryos. E3S Web of Conferences. 2023;421:04009. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342104009>
23. Vukomanovic D., Jia Z., Nakatsu K., Smith G. N., Ozolinš T. R. S. Riboflavin and pyrroloquinoline quinone generate carbon monoxide in the presence of tissue microsomes or recombinant human cytochrome P-450 oxidoreductase: implications for possible roles in gasotransmission. Canadian Journal of Physiology and Pharmacology. 2020;98(5):336–342. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjpp-2019-0376>
24. Dilfuza T., Mashhura P., Parida M., Babakhanova D., Alimova R. Effect of pesticides on the content of cytochrome P-450 of the monooxygenase system and on the ultrastructure of hepatocytes in rat embryos. European Journal of Molecular and Clinical Medicine. 2020;7(3):2473–2483.
25. Gaisina A. A., Mekhtiev A. A., Nurullayeva A. N., Palatnikov G. M., Shamilov E. N. The impact of background γ -radiation on erythrocyte nuclear pathology, the serotonergic system, and cytochrome P-450 in hens (GALLUS GALLUS DOMESTICUS) from Azerbaijan. Ecotoxicology. 2022;31(5):846–851. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10646-022-02540-8>
26. Takiyama M., Matsumoto T., Kaifuchi N., Mizuhara Y., Warabi E., Ohbuchi K., Mizoguchi K. *In vitro* assessment of the inhibitory effect of goreisan extract and its ingredients on the P-glycoprotein drug transporter and cytochrome P-450 metabolic enzymes. Xenobiotica. 2022;52(5):511–519. DOI: <https://doi.org/10.1080/00498254.2022.2078750>
27. Baameur L., Aggoun D., Messasma Z., Bouet G., Le Guillanton G., Daran J. C., Ourari A. Synthesis, crystal structure, quantum chemical calculations, electrochemistry and electro-catalytic properties as cytochrome P-450 model of tetradentate Mn(III)-Schiff base complex. Indian Journal of Chemical Technology. 2022;29(4):339–353. DOI: <https://doi.org/10.56042/ijct.v29i4.56950>
28. Махмудова Г. А. Влияние фермента цитохрома P-450 CYP2D6 на метаболизм тамоксифена при потенциальном совместном применении с селективными ингибиторами обратного захвата серотонина. Генетика в системе медицинских наук: мат-лы Юбилейной V Межвуз. (I Всеросс.) междисциплинар. студен. научн.-практ. конф. с междунар. участием. М.: ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И. М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), 2023. С. 110–112.
29. El-Ghiaty M. A., El-Mahrouk S. R., Alqahtani M. A., El-Kadi A. O. S. Differential modulation of cytochrome P450 enzymes by arsenicals in non-human experimental models. Drug metabolism reviews. 2023;55(4):405–427. DOI: <https://doi.org/10.1080/03602532.2023.2254525>
30. Solanki M., Pointon A., Jones B., Herbert K. Cytochrome P450 2J2: Potential Role in Drug Metabolism and Cardiotoxicity. Drug metabolism and disposition. 2018;46(8):1053–1065. DOI: <https://doi.org/10.1124/dmd.117.078964>
31. Mohammed B., Dizaye K., Amin B. Drug metabolism and cytochrome P-450 (CYPs). Zanco Journal of Medical Sciences. 2024;28(1):119–128. DOI: <https://doi.org/10.15218/zjms.2024.012>
32. Asadi F., Fatemi M. H. Modeling of cytochrome P-450 enzyme inhibitors activities using 2D/3D QSAR. SN Applied Sciences. 2020;2(9):1580. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03318-5>
33. Nawaz U., Noor M., Waheed A. Cytochrome P-450 CYP2C19 genetic polymorphism and its relation with clopidogrel resistance. The Journal of the Pakistan Medical Association. 2023;73(12):2388–2392. DOI: <https://doi.org/10.47391/JPMA.8025>
34. Пилат Т. Л., Кузьмина Л. П., Коляскина М. М., Безрукавникова Л. М. Роль желудочно-кишечного тракта в процессах интоксикации и детоксикации организма. Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. 2020;(11):118–125. DOI: <https://doi.org/10.31146/1682-8658-ecg-183-11-118-125> EDN: SQSQW
35. Hsu M. H., Johnson E. F. Structural characterization of the homotropic cooperative binding of azamulin to human cytochrome P450 3A5. Journal of Biological Chemistry. 2022;298(5):101909. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbc.2022.101909>
36. Grzegorzewski Ja., Bartsch F., Köller A., König M. Pharmacokinetics of Caffeine: A Systematic Analysis of Reported Data for Application in Metabolic Phenotyping and Liver Function Testing. Frontiers in Pharmacology. 2022;12: 752826. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.752826>
37. Kolisnyk I., Voloshin O., Savchenko I., Yanchevskyi O., Rashidi B. Enzymatic activity in microsomes, lipid peroxidation of mice hepatocytes under the sodium fluoride. Georgian Medical News. 2021;310:169–176.
38. Неумоина М. В., Шмакова Т. В., Перфилова К. М., Неумоина Н. В., Шутова И. В., Денисенко Т. Л., Трошина Т. А. Влияние полиморфизма CYP2C19 на метаболизм и эффективность использования ингибиторов протонной помпы (Обзор клинико-лабораторных исследований). Здоровье населения и среда обитания. 2021;(4):66–73. DOI: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2021-337-4-66-73> EDN: GTTSME
39. Турсунова Н. В., Сыров В. Н., Хушбакова З. А., Торнуев Ю. В., Клиникова М. Г. Система монооксигеназ и обмен оксида азота в микросомах печени крыс при токсическом гепатите и воздействии сесквитерпеновых лактонов. Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2021;172(8):157–161. DOI: <https://doi.org/10.47056/0365-9615-2021-172-8-157-161> EDN: VBOTUO

40. Tursunova N. V., Syrov V. N., Khushbaktova Z. A., Tornuev Y. V., Klinnikova M. G. Monooxygenase System and NO Metabolism in Liver Microsomes of Rats with Toxic Hepatitis and the Effect of Sesquiterpene Lactones. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2021;172(2):133–136. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10517-021-05349-3>
41. Рахматов А. Б., Хикматов Р. С., Якубов М. Д., Абдурахимов А. А. Роль полиморфизма генов системы детоксикации ксенобиотиков в патогенезе кожного лейшманиоза. *Дерматовенерология. Косметология*. 2021;7(1):16–23. DOI: <https://doi.org/10.34883/PI.2021.7.1.011> EDN: FVZZNA
42. Контаров Н. А., Погарская И. В., Бахромеева А. А., Контарова Е. О., Юминова Н. В. Изучение содержания цитохрома р-450 в ходе метаболизма полиаллиламина, обладающего противовирусной активностью. *Известия ГГТУ. Медицина, фармация*. 2022;(2):29–32. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48667019> EDN: LMOBPT
43. Degraeve A. L., Haufroid V., Loriot A., Gatto L., Andries V., Vereecke L., et al. Gut microbiome modulates tacrolimus pharmacokinetics through the transcriptional regulation of ABCB1. *Microbiome*. 2023;11(1):138. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40168-023-01578-y>
44. Guillemot-Legris O., Muccioli G. G. The oxysterome and its receptors as pharmacological targets in inflammatory diseases. *British Journal of Pharmacology*. 2022;179(21):4917–4940. DOI: <https://doi.org/10.1111/bph.15479>
45. De Jong L. M., Jiskoot W., Manson M. L., Swen J. J. Distinct effects of inflammation on cytochrome P450 regulation and drug metabolism: Lessons from experimental models and a potential role for pharmacogenetics. *Genes*. 2020;11(12):1509. DOI: <https://doi.org/10.3390/genes11121509>
46. Попова О. С., Понамарев В. С., Кострова А. В., Агафонова Л. А. Фармакокинетические параметры кофеина у лабораторных животных в контексте оценки функционального состояния печени. *Международный вестник ветеринарии*. 2023;(2):142–149. DOI: <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2023.2.142> EDN: UAXPQW
47. Ходжаева М. Ю., Абдурахадов А. Свободные радикалы и их роль в возникновении оксидативного стресса. *Интернаука*. 2023;(36-1(306)):31–34.
48. Squair C. Generalized Anxiety Disorder (GAD) in a teaching laboratory beagle: Presentation, relative contributions, and treatment. *Journal of Veterinary Behavior: Clinical Applications and Research*. 2023;64-65:1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2023.05.008>
49. Rogaleva E., Semenenko K., Grin V., Svinkov A., Kuzminova E., Semenenko M. Evaluation of the Effectiveness of a New Selenium-Containing Drug at Acute Model Liver Damage in Poultry. *Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East: Agricultural Innovation Systems*. Ussuriysk: Springer, Cham, 2022. pp. 243–252. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-91405-9_26
50. Husain I., Khan I. A., Khan S. I., Bala K. A review on phytochemicals, pharmacological activities, drug interactions, and associated toxicities of licorice (*Glycyrrhiza* sp.). *Food Frontiers*. 2021;2(4):449–485. DOI: <https://doi.org/10.1002/fft2.110>
51. Schwier N. C., Cornelio C. K., Boylan P. M. A systematic review of the drug–drug interaction between statins and colchicine: Patient characteristics, etiologies, and clinical management strategies. *Pharmacotherapy*. 2022;42(4):320–333. DOI: <https://doi.org/10.1002/phar.2674>
52. Kapelemera A. M., Uang Y. S., Wang L. H., Wu T. Y., Lee F. Y., Tai L., Wang C. C., Lee C. J. Pharmacokinetic Herb-Drug Interactions of Xiang-Sha-Liu-Jun-Zi-Tang and Paclitaxel in Male Sprague Dawley Rats and Its Influence on Enzyme Kinetics in Human Liver Microsomes. *Frontiers in Pharmacology*. 2022;13:858007. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.858007>
53. Матошин С. В., Шрамко С. В. Полиморфизм генов ферментов системы биотрансформации ксенобиотиков и их роль при ранней потере беременности. *Фундаментальная и клиническая медицина*. 2023;8(4):133–141. DOI: <https://doi.org/10.23946/2500-0764-2023-8-4-134-141> EDN: ZGRQNV
54. Manis M. M., Petersen K., Roberts M. Z., Kyle J. A. Managing the Drug-Drug Interaction With Apixaban and Primidone: A Case Report. *Hospital Pharmacy*. 2023;58(4):345–349. DOI: <https://doi.org/10.1177/00185787221150928>
55. Seviour D. K., Pelkonen O., Ahokas J. T. Hepatocytes: the powerhouse of biotransformation. *The international journal of biochemistry & cell biology*. 2012;44(2):257–261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocel.2011.11.011>
56. Sychev D. A., Ashraf G. M., Svistunov A. A., Maksimov M. L., Tarasov V. V., Chubarev V. N. et al. The cytochrome P450 isoenzyme and some new opportunities for the prediction of negative drug interaction *in vivo*. *Drug design, development and therapy*. 2018;12:1147–1156. DOI: <https://doi.org/10.2147/DDDT.S149069>
57. Baillie T. A., Rettie A. E. Role of biotransformation in drug-induced toxicity: influence of intra- and inter-species differences in drug metabolism. *Drug metabolism and pharmacokinetics*. 2011;26(1):15–29. DOI: <https://doi.org/10.2133/dmpk.dmpk-10-rv-089>
58. Rodríguez Arcas M. J., García-Jiménez E., Martínez-Martínez F., Conesa-Zamora P. Role of CYP450 in pharmacokinetics and pharmacogenetics of antihypertensive drugs. *Farmacia hospitalaria*. 2011;35(2):84–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.farma.2010.05.006>

59. You M. W., Kim H. J., Lim H. S., Kim S. Y., Byun J. H., Kim K. W., et al. Assessment of Liver Function Using Pharmacokinetic Parameters of Gd-EOB-DTPA: Experimental Study in Rat Hepatectomy Model. *Contrast media & molecular imaging*. 2018;6321316. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/6321316>
60. Понамарев В. С., Попова О. С., Кострова А. В., Агафонова Л. А. Клиренс-тесты как метод диагностики патологий гепатобилиарной системы у животных. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2023;24(6):924–938. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.6.924-938> EDN: TKBPLY

References

1. Abramyan A. S., Makarova L. M., Pogorelyy V. E. On the issue of interspecific differences in the cytochrome P450 system during preclinical drug trials. Current problems of natural sciences and pharmacy: collection of articles of the All-Russian Scientific Conference. Yoshkar-Ola: *Mariyskiy GU*, 2023. pp. 311–314. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54627907&pff=1>
2. Gorina S. S., Toporkova Ya. Yu. Comparative analysis of hemoproteins (cytochrome P450 and catalase) participating in the biosynthesis of oxylipins in plants and animals. New technologies in medicine, biology, pharmacology and ecology: International research. Conference NT + M&Ec'2020. Spring session. Moscow, 2021. Moscow: *Institut novykh informatsionnykh tekhnologiy*, 2021. pp. 274–279. DOI: <https://doi.org/10.47501/978-5-6044060-1-4.48>
3. Koroleva E. S., Ponamarev V. S. Effect of the drug "Hepaton" on the cytochrome P450 index. Ecology and nature management: Proceedings of International scientific and practical conference. Nazran' – Kantyshevo: *ООО «КЕР»*, 2020. pp. 131–133.
4. Latypova E. A., Shishkina T. V., Kamburova V. S. Analysis of the impact of environmental ecotoxics on enzymes and genes of the mammalian xenobiotic metabolism system. *Natsional'noe zdorov'e* = National Health. 2021;(2):52–55. (In Russ.).
5. Mandzhieva A. A., Lukina P. A., Vechkitov R. S., Avetisova I. V. Methods for studying the mechanisms of biotransformation of xenobiotics in vitro. Student Scientific Forum: Proceedings of the International student scientific conference. Saratov: *ООО «Evroaziatskaya nauchno-promyshlennaya palata»*, 2021. Vol. VIII. pp. 22–23. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45678037>
6. Miroshnikov M. V., Sultanova K. T., Makarova M. N., Makarov V. G. A comparative review of the activity of enzymes of the cytochrome P450 system in humans and laboratory animals. Prognostic value of preclinical models *in vivo*. *Translyatsionnaya meditsina* = Translational Medicine. 2022;9(5):44–77. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18705/2311-4495-2022-9-5-44-77>
7. Popova O. S., Ponamarev V. S., Kostrova A. V., Agafonova L. A. Pharmacokinetic parameters of caffeine in laboratory animals in the context of assessing the functional state of the liver. *Mezhdunarodnyy vestnik veterinarii* = International Journal of Veterinary Medicine. 2023;(2):142–149. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2023.2.142>
8. Rembovskiy V. R., Mogilenkova L. A. Detoxification processes when chemicals affect the body. Saint-Petersburg: *izd-vo Politekhnikeskogo u-ta*, 2017. 384 p. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38561435>
9. Smirnov L. P., Sukhovskaya I. V., Borvinskaya E. V. Ethoxyresorufin o-deethylase -systematic accessory and its functional features of phase I enzyme of xenobiotics biotransformation (review). *Uchenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* = Proceedings of Petrozavodsk State University. 2015;(4):18–21. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25069573>
10. Zemanova N., Anzenbacher P., Anzenbacherova E. The role of cytochromes P450 in the metabolism of selected antidepressants and anxiolytics under psychological stress. Biomedical papers of the Medical Faculty of the University Palacky, Olomouc, Czech Republic. 2022;166(2):140–149. DOI: <https://doi.org/10.5507/bp.2022.019>
11. Dekant W. The role of biotransformation and bioactivation in toxicity. *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology*. 2009;99:57–86. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8336-7_3
12. Jackson K. D., Durandis R., Vergne M. J. Role of Cytochrome P450 Enzymes in the Metabolic Activation of Tyrosine Kinase Inhibitors. *International journal of molecular sciences*. 2018;19(8):2367. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms19082367>
13. Fayngor A. I., Sinitsyna N. I., Vorob'ev A. N., Abramovich R. A., Potanina O. G. Introduction of a dye in the development of a test system for phenotyping cytochrome P450 isoenzymes. Harmonization of approaches to pharmaceutical development: collection of theses of the III International scientific and practical conference. Moscow: *Rossiyskiy u-t družby narodov (RUDN)*, 2020. pp. 4–6. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44818800>
14. Polyakova I. S., Churnosov M. I., Pakhomov S. P., Orlova V. S. Molecular and genetic mechanisms of xenobiotic biotransformation. *Aktual'nye problemy meditsiny* = Challenges in modern medicine. 2011;(16(11)):223–228. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19403719>
15. Manikandan P., Nagini S. Cytochrome P450 Structure, Function and Clinical Significance: A Review. *Current Drug Targets*. 2018;19(1):38–54. DOI: <https://doi.org/10.2174/1389450118666170125144557>

16. Shchelkanov E. M., Tishina E. A., Manukov Yu. I., Saprykin V. P. Biotransformation of xenobiotics by molluscs (*Mollusca* L., 1758) – indicators of aquatic ecosystem pollution. *Geograficheskaya sreda i zhivye sistemy* = Geographical Environment and Living Systems. 2024;(1):154–173. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18384/2712-7621-2024-1-154-181>
17. Bogaards J. J., Bertrand M., Jackson P., Oudshoorn M. J., Weaver R. J., van Bladeren P. J., Walther B. Determining the best animal model for human cytochrome P450 activities: a comparison of mouse, rat, rabbit, dog, micropig, monkey and man. *Xenobiotica*. 2000;30(12):1131–1152. DOI: <https://doi.org/10.1080/00498250010021684>
18. Esteves F., Rueff J., Kranendonk M. The Central Role of Cytochrome P450 in Xenobiotic Metabolism-A Brief Review on a Fascinating Enzyme Family. *Journal of Xenobiotics*. 2021;11(3):94–114. DOI: <https://doi.org/10.3390/jox11030007>
19. Finnigan J. D., Young C., Cook D. J., Charnock S. J., Black G. W. Cytochromes P450 (P450s): A review of the class system with a focus on prokaryotic P450s. *Advances in Protein Chemistry and Structural Biology*. 2020;122:289–320. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.apcsb.2020.06.005>
20. Reed L., Arlt V. M., Phillips D. H. The role of cytochrome P450 enzymes in carcinogen activation and detoxication: an in vivo-in vitro paradox. *Carcinogenesis*. 2018;39(7):851–859. DOI: <https://doi.org/10.1093/carcin/bgy058>
21. Oesch F., Fabian E., Guth K., Landsiedel R. Xenobiotic-metabolizing enzymes in the skin of rat, mouse, pig, guinea pig, man, and in human skin models. *Archives of Toxicology*. 2014;88(12):2135–2190. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-014-1382-8>
22. Tuychieva D., Alimova R., Mirkhamidova P. Content of cytochrome P-450 in microsomal fractions of the liver of pregnant rats and their embryos. *E3S Web of Conferences*. 2023;421:04009. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342104009>
23. Vukomanovic D., Jia Z., Nakatsu K., Smith G. N., Ozolinš T. R. S. Riboflavin and pyrroloquinoline quinone generate carbon monoxide in the presence of tissue microsomes or recombinant human cytochrome P-450 oxidoreductase: implications for possible roles in gasotransmission. *Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*. 2020;98(5):336–342. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjpp-2019-0376>
24. Difuza T., Mashhura P., Parida M., Babakhanova D., Alimova R. Effect of pesticides on the content of cytochrome P-450 of the monooxygenase system and on the ultrastructure of hepatocytes in rat embryos. *European Journal of Molecular and Clinical Medicine*. 2020;7(3):2473–2483.
25. Gaisina A. A., Mekhtiev A. A., Nurullayeva A. N., Palatnikov G. M., Shamilov E. N. The impact of background γ -radiation on erythrocyte nuclear pathology, the serotonergic system, and cytochrome P-450 in hens (*GALLUS GALLUS DOMESTICUS*) from Azerbaijan. *Ecotoxicology*. 2022;31(5):846–851. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10646-022-02540-8>
26. Takiyama M., Matsumoto T., Kaifuchi N., Mizuhara Y., Warabi E., Ohbuchi K., Mizoguchi K. *In vitro* assessment of the inhibitory effect of goreisan extract and its ingredients on the P-glycoprotein drug transporter and cytochrome P-450 metabolic enzymes. *Xenobiotica*. 2022;52(5):511–519. DOI: <https://doi.org/10.1080/00498254.2022.2078750>
27. Baameur L., Aggoun D., Messasma Z., Bouet G., Le Guillanton G., Daran J. C., Ourari A. Synthesis, crystal structure, quantum chemical calculations, electrochemistry and electro-catalytical properties as cytochrome P-450 model of tetradentate Mn(III)-Schiff base complex. *Indian Journal of Chemical Technology*. 2022;29(4):339–353. DOI: <https://doi.org/10.56042/ijct.v29i4.56950>
28. Makhmudova G. A. Effect of the cytochrome P-450 CYP2D6 enzyme on tamoxifen metabolism with potential co-administration with selective serotonin reuptake inhibitors. *Genetics in the system of medical sciences: Proceedings of the Jubilee V Inter-University. ((I All-Russian) interdisciplinary student scientific and practical conference with international participation. Moscow: FGAOU VO Pervyy MGIMU im. I. M. Sechenova Minzdrava Rossii (Sechenovskiy Universitet), 2023. pp. 110–112.*
29. El-Ghiaty M. A., El-Mahrouk S. R., Alqahtani M. A., El-Kadi A. O. S. Differential modulation of cytochrome P450 enzymes by arsenicals in non-human experimental models. *Drug metabolism reviews*. 2023;55(4):405–427. DOI: <https://doi.org/10.1080/03602532.2023.2254525>
30. Solanki M., Pointon A., Jones B., Herbert K. Cytochrome P450 2J2: Potential Role in Drug Metabolism and Cardiotoxicity. *Drug metabolism and disposition*. 2018;46(8):1053–1065. DOI: <https://doi.org/10.1124/dmd.117.078964>
31. Mohammed B., Dizaye K., Amin B. Drug metabolism and cytochrome P-450 (CYPs). *Zanco Journal of Medical Sciences*. 2024;28(1):119–128. DOI: <https://doi.org/10.15218/zjms.2024.012>
32. Asadi F., Fatemi M. H. Modeling of cytochrome P-450 enzyme inhibitors activities using 2D/3D QSAR. *SN Applied Sciences*. 2020;2(9):1580. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03318-5>
33. Nawaz U., Noor M., Waheed A. Cytochrome P-450 CYP2C19 genetic polymorphism and its relation with clopidogrel resistance. *The Journal of the Pakistan Medical Association*. 2023;73(12):2388–2392. DOI: <https://doi.org/10.47391/JPMA.8025>

34. Pilat T. L., Kuzmina L. P., Kolyaskina M. M., Bezrukavnikova L. M. The role of the gastrointestinal tract in the processes of intoxication and detoxification of the body. *Ekspierimental'naya i klinicheskaya gastroenterologiya* = Experimental and Clinical Gastroenterology. 2020;(11):118–125. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31146/1682-8658-ecg-183-11-118-125>
35. Hsu M. H., Johnson E. F. Structural characterization of the homotropic cooperative binding of azamulin to human cytochrome P450 3A5. *Journal of Biological Chemistry*. 2022;298(5):101909. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbc.2022.101909>
36. Grzegorzewski Ja., Bartsch F., Köller A., König M. Pharmacokinetics of Caffeine: A Systematic Analysis of Reported Data for Application in Metabolic Phenotyping and Liver Function Testing. *Frontiers in Pharmacology*. 2022;12: 752826. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.752826>
37. Kolisnyk I., Voloshin O., Savchenko I., Yanchevskyi O., Rashidi B. Enzymatic activity in microsomes, lipid peroxidation of mice hepatocytes under the sodium fluoride. *Georgian Medical News*. 2021;310:169–176.
38. Neumoina M. I., Shmakova T. V., Perfilova K. M., Neumoina N. V., Shutova I. V., Denisenko T. L., Troshina T. A. Effects of CYP2C19 Polymorphism on Metabolism and Effectiveness of Proton Pump Inhibitors: A Review of Clinical and Laboratory Studies. *Public Health and Life Environment – PH&LE*. 2021;(4):66–73. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2021-337-4-66-73>
39. Tursunova N. V., Syrov V. N., Khushbaktova Z. A., Tornuev Yu. V., Klinnikova M. G. Monooxygenase system and no metabolism in liver microsomes of rats with toxic hepatitis and the effect of sesquiterpene lactones. *Byulleten' eksperimental'noy biologii i meditsiny* = Bulletin of Experimental Biology and Medicine. 2021;172(8):157–161. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.47056/0365-9615-2021-172-8-157-161>
40. Tursunova N. V., Syrov V. N., Khushbaktova Z. A., Tornuev Y. V., Klinnikova M. G. Monooxygenase System and NO Metabolism in Liver Microsomes of Rats with Toxic Hepatitis and the Effect of Sesquiterpene Lactones. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2021;172(2):133–136. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10517-021-05349-3>
41. Rakhmatov A. B., Khikmatov R. S., Yakubov M. D., Abdurakhimov A. A. Role of xenobiotic detoxification system gene polymorphism in the pathogenesis of cutaneous leishmaniasis. *Dermatovenerologiya. Kosmetologiya*. 2021;7(1):16–23. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34883/PI.2021.7.1.011>
42. Kontarov N. A., Pogarskaya I. V., Bakhromeeva A. A., Kontarova E. O., Yuminova N. V. Determination of thermodynamic binding parameters and type of interaction between the influenza virus hemagglutinin and phosphatidylcholine liposomes. *Izvestiya GGTU. Meditsina, farmatsiya*. 2022;(2):29–32. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48667019>
43. Degraeve A. L., Haufroid V., Lioriot A., Gatto L., Andries V., Vereecke L., et al. Gut microbiome modulates tacrolimus pharmacokinetics through the transcriptional regulation of ABCB1. *Microbiome*. 2023;11(1):138. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40168-023-01578-y>
44. Guillemot-Legris O., Muccioli G. G. The oxysterome and its receptors as pharmacological targets in inflammatory diseases. *British Journal of Pharmacology*. 2022;179(21):4917–4940. DOI: <https://doi.org/10.1111/bph.15479>
45. De Jong L. M., Jiskoot W., Manson M. L., Swen J. J. Distinct effects of inflammation on cytochrome P450 regulation and drug metabolism: Lessons from experimental models and a potential role for pharmacogenetics. *Genes*. 2020;11(12):1509. DOI: <https://doi.org/10.3390/genes11121509>
46. Popova O. S., Ponamarev V. S., Kostrova A. V., Agafonova L. A. Pharmacokinetic parameters of caffeine in laboratory animals in the context of assessing the functional state of the liver. *Mezhdunarodnyy vestnik veterinarii* = International Journal of Veterinary Medicine. 2023;(2):142–149. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.52419/issn2072-2419.2023.2.142>
47. Khodzhaeva M. Yu., Abduakhadov A. Free radicals and their role in oxidative stress. *Internauka*. 2023;(36-1(306)):31–34. (In Russ.).
48. Squair C. Generalized Anxiety Disorder (GAD) in a teaching laboratory beagle: Presentation, relative contributions, and treatment. *Journal of Veterinary Behavior: Clinical Applications and Research*. 2023;64-65:1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2023.05.008>
49. Rogaleva E., Semenenko K., Grin V., Svinkov A., Kuzminova E., Semenenko M. Evaluation of the Effectiveness of a New Selenium-Containing Drug at Acute Model Liver Damage in Poultry. *Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East: Agricultural Innovation Systems*. Ussuriysk: Springer, Cham, 2022. pp. 243–252. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-91405-9_26
50. Husain I., Khan I. A., Khan S. I., Bala K. A review on phytochemicals, pharmacological activities, drug interactions, and associated toxicities of licorice (*Glycyrrhiza* sp.). *Food Frontiers*. 2021;2(4):449–485. DOI: <https://doi.org/10.1002/fft2.110>
51. Schwier N. C., Cornelio C. K., Boylan P. M. A systematic review of the drug–drug interaction between statins and colchicine: Patient characteristics, etiologies, and clinical management strategies. *Pharmacotherapy*. 2022;42(4):320–333. DOI: <https://doi.org/10.1002/phar.2674>

52. Kapelemera A. M., Uang Y. S., Wang L. H., Wu T. Y., Lee F. Y., Tai L., Wang C. C., Lee C. J. Pharmacokinetic Herb-Drug Interactions of Xiang-Sha-Liu-Jun-Zi-Tang and Paclitaxel in Male Sprague Dawley Rats and Its Influence on Enzyme Kinetics in Human Liver Microsomes. *Frontiers in Pharmacology*. 2022;13:858007. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphar.2022.858007>
53. Matoshin S. V., Shramko S. V. Polymorphism of xenobiotic biotransformation enzyme genes and their role in early pregnancy loss. *Fundamental'naya i klinicheskaya meditsina* = Fundamental and Clinical Medicine. 2023;8(4):133–141. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.23946/2500-0764-2023-8-4-134-141>
54. Manis M. M., Petersen K., Roberts M. Z., Kyle J. A. Managing the Drug-Drug Interaction With Apixaban and Primidone: A Case Report. *Hospital Pharmacy*. 2023;58(4):345–349. DOI: <https://doi.org/10.1177/00185787221150928>
55. Seviour D. K., Pelkonen O., Ahokas J. T. Hepatocytes: the powerhouse of biotransformation. *The international journal of biochemistry & cell biology*. 2012;44(2):257–261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocel.2011.11.011>
56. Sychev D. A., Ashraf G. M., Svistunov A. A., Maksimov M. L., Tarasov V. V., Chubarev V. N., et al. The cytochrome P450 isoenzyme and some new opportunities for the prediction of negative drug interaction *in vivo*. *Drug design, development and therapy*. 2018;12:1147–1156. DOI: <https://doi.org/10.2147/DDDT.S149069>
57. Baillie T. A., Rettie A. E. Role of biotransformation in drug-induced toxicity: influence of intra- and inter-species differences in drug metabolism. *Drug metabolism and pharmacokinetics*. 2011;26(1):15–29. DOI: <https://doi.org/10.2133/dmpk.dmpk-10-rv-089>
58. Rodríguez Arcas M. J., García-Jiménez E., Martínez-Martínez F., Conesa-Zamora P. Role of CYP450 in pharmacokinetics and pharmacogenetics of antihypertensive drugs. *Farmacia hospitalaria*. 2011;35(2):84–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.farma.2010.05.006>
59. You M. W., Kim H. J., Lim H. S., Kim S. Y., Byun J. H., Kim K. W., et al. Assessment of Liver Function Using Pharmacokinetic Parameters of Gd-EOB-DTPA: Experimental Study in Rat Hepatectomy Model. *Contrast media & molecular imaging*. 2018;6321316. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/6321316>
60. Ponamarev V. S., Popova O. S., Kostrova A. V., Agafonova L. A. Clearance tests as a diagnosis method of hepatobiliary system pathologies in animals. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(6):924–938. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.6.924-938>

Сведения об авторах

✉ **Понамарёв Владимир Сергеевич**, кандидат вет. наук, доцент кафедры фармакологии и токсикологии, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины», ул. Черниговская, д. 5, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196084, e-mail: secretary@spbguvvm.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6852-3110>, e-mail: psevdopyos@mail.ru

Попова Ольга Сергеевна, кандидат вет. наук, доцент, доцент кафедры фармакологии и токсикологии, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины», ул. Черниговская, д. 5, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196084, e-mail: secretary@spbguvvm.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0650-0837>

Украинская Ольга Алексеевна, студент 5-го курса, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет ветеринарной медицины», ул. Черниговская, д. 5, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196084, e-mail: secretary@spbguvvm.ru

Information about the authors

✉ **Vladimir S. Ponamarev**, PhD in Veterinary Science, associate professor at the Department of Pharmacology and Toxicology, Saint Petersburg State University of Veterinary Medicine, Chernigovskaya St., 5, Saint Petersburg, Russian Federation, 196084, e-mail: secretary@spbguvvm.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6852-3110>, e-mail: psevdopyos@mail.ru

Olga S. Popova, PhD in Veterinary Science, associate professor, associate professor at the Department of Pharmacology and Toxicology, Saint Petersburg State University of Veterinary Medicine, Chernigovskaya St., 5, Saint Petersburg, Russian Federation, 196084, e-mail: secretary@spbguvvm.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0650-0837>

Olga A. Ukrainskaya, 5th-year student, Saint Petersburg State University of Veterinary Medicine, Chernigovskaya St., 5, Saint Petersburg, Russian Federation, 196084, e-mail: secretary@spbguvvm.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.40-47>

УДК 633.16:631.811.98

Влияние регулятора роста растений Биосил на продуктивность ячменя ярового на темно-серой почве Центрального региона РФ

© 2025. О. В. Левакова✉

Институт семеноводства и агротехнологий – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», с. Подвязье, Рязанская область, Российская Федерация

Эффективность применения биологического регулятора роста растений Биосил (100 г/л смеси тритерпеновых кислот) с нормой расхода 0,02 л/га изучали в посевах ячменя ярового сорта Яромир (2021–2023 гг.) в условиях Рязанской области (Нечерноземная зона Центрального региона РФ) на темно-серой почве среднего уровня плодородия. Схема полевого опыта: 1) контроль (без обработки); 2) однократное опрыскивание посевов регулятором роста Биосил в фазу «кущение»; 3) двукратное – в фазы «кущение», «выход в трубку»; 4) трехкратное – в фазы «кущение», «выход в трубку», «появление флагового листа». Выявлено, что величина урожая зависела от числа растений, сохранившихся к уборке ($r = 0,709$). Максимальные показатели сохранности растений перед уборкой (76,2 %) зафиксированы в варианте с трехкратным опрыскиванием растений, минимальные (58,9 %) – в контрольном. Установлено, что обработка посевов Биосил во всех вариантах опыта способствовала статистически значимому увеличению урожайности зерна ячменя ярового в сравнении с контролем от 11,4 % (однократное опрыскивание) до 20,7 % (трехкратное опрыскивание). Выявлен существенный вклад в формирование урожайности биометрических элементов: длина колоса ($r = 0,503$), количество зерен в колосе ($r = 0,830$), масса зерна с колоса ($r = 0,746$) и масса 1000 зерен ($r = 0,996$). Наибольшему накоплению белка (13,3 %) способствовало однократное опрыскивание посевов в фазу «кущение», наименьшему (12,6 %) – трехкратное. При расчете экономической эффективности установлено, что максимальные показатели условно чистого дохода и уровня рентабельности (74,8 %) достигнуты при однократном применении регулятора роста Биосил в фазу «кущение» при урожайности ячменя Яромир 7,78 т/га.

Ключевые слова: *Hordeum vulgare* L., регулятор роста и развития растений, продуктивность, структура урожая, содержание белка, корреляционная взаимосвязь, экономическая эффективность.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № FGUN-2022-0013).

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

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Левакова О. В. Влияние регулятора роста растений Биосил на продуктивность ячменя ярового на темно-серой почве Центрального региона РФ. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(1):40–47.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.40-47>

Поступила: 08.11.2023

Принята к публикации: 24.02.2025

Опубликована онлайн: 26.02.2025

The influence of the plant growth regulator Biosil on the productivity of spring barley on dark gray soil in the Central region of the Russian Federation

© 2025. Olga V. Levakova✉

Institute of Seed Production and Agrotechnologies – branch of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Ryazan region, Russian Federation

The effectiveness of using the biological growth regulator Biosil (100 g/l of a mixture of triterpenic acids) with a consumption rate of 0.02 l/ha was studied in crops of 'Yaromir' spring barley (2021–2023) in the Ryazan region (Non-Black Earth zone of the Central Region of the Russian Federation) on dark gray soil of average fertility. The scheme of the field experiment: 1) control (without treatment); 2) single spraying of crops with a Biosil growth regulator in the "tillering" phase; 3) double – in the "tillering", "shooting" phases; 4) triple – in the "tillering", "shooting", "flag leaf emergence" phases. It was revealed that the yield value depended on the number of plants preserved for harvesting ($r = 0.709$). The maximum indicators of plant safety before harvesting (76.2 %) were recorded in the variant with three-fold spraying of plants, the minimum (58.9 %) – in the control variant. It was found that the treatment of Biosil crops in all experimental variants contributed to a statistically significant increase in the yield of spring barley grain in comparison with the control from 11.4 % (single spraying) to 20.7 % (triple spraying). A significant contribution to the formation of biometric elements was revealed: the length of the ear ($r = 0.503$), the number of grains in the ear ($r = 0.830$), the weight of grain from the ear ($r = 0.746$) and

the weight of 1000 grains ($r = 0.996$). The greatest accumulation of protein (13.3 %) was due to single spraying of crops in the "tillering" phase, the least (12.6 %) was due to triple spraying. When calculating economic efficiency, it was found that the maximum indicators of conditional net income and profitability (74.8 %) were achieved with a single application of the Biosil growth regulator in the "tillering" phase with a yield of 'Yaromir' barley of 7.78 t/ha.

Keywords: *Hordeum vulgare* L., plant growth and development regulator, productivity, crop structure, protein content, correlation relationship, economic efficiency.

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. FGUN-2022-0013).

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

Conflict of interest: the author has stated that there is no conflict of interest.

For citation: Levakova O. V. The influence of the plant growth regulator Biosil on the productivity of spring barley on dark gray soil in the Central region of the Russian Federation. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):40–47. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.40-47>

Received: 08.11.2023

Accepted for publication: 24.02.2025

Published online: 26.02.2025

Ячмень яровой (*Hordeum vulgare* L.) является одной из преобладающих агрокультур во всем мире и используется в разных сферах производства [1, 2]. В Центральном регионе РФ ячмень культивируется, главным образом, на фуражные цели. В настоящее время стратегия развития растениеводческой отрасли России направлена на повышение продовольственной безопасности страны. Получение качественного, высокостабильного урожая зерновой продукции позволит не только создать стратегические запасы, но также увеличить экспорт зерна на международный рынок [3].

Для подъема урожайности зерновых культур существенным элементом технологии возделывания являются регуляторы роста и развития растений (РРРР) [4, 5]. В последнее время производителей растениеводческой продукции все больше интересуют РРРР, содержащие природные компоненты. Такие препараты привлекают своей экологичностью, сочетаются с любыми водорастворимыми удобрениями и пестицидами в баковой смеси [6, 7].

Регуляторы роста и развития растений (или стимуляторы роста (СР)) применяются в сельском хозяйстве более 70 лет [8]. Их используют для воздействия на параметры роста и развития органов и растений в целом в разные фазы, а также на реакцию растений в условиях влияния факторов стресса. Перспективность более широкого применения РРРР в сельскохозяйственном производстве определяется низкими нормами расхода и возможностью управлять процессами роста и развития растений. С точки зрения многих ученых, регуляторы роста растений в обозримом будущем будут пользоваться стабильным спросом как минеральные удобрения и средства защиты растений [9, 10].

Многочисленными исследованиями показана перспектива применения РРРР для улучшения роста и развития разных агрокультур, проявившаяся в увеличении структурных показателей и урожайности [11, 12, 13].

В настоящее время рынок наполнен довольно большим количеством различных видов РРРР. Поэтому комплексный подход к применению биорегуляторов роста растений, обладающих как росторегулирующим, так и иммуностимулирующим действием в системе элементов технологии в определенных почвенно-климатических условиях, актуален и в настоящее время [14].

Цель исследований – изучить влияние РРРР Биосил на продуктивность и экономическую эффективность возделывания ячменя ярового, выявить оптимальный вариант применения РРРР Биосил в условиях Рязанской области (Нечерноземная зона Центрального региона РФ).

Научная новизна – изучение эффективности опрыскивания посевов ярового ячменя РРРР Биосил в зависимости от кратности обработок.

Материалы и методы. Исследования проводили в 2021–2023 гг. в полевом опыте Института семеноводства агротехнологий – филиале ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (Рязанская область).

Почва участка – темно-серая лесная, тяжелосуглинистая по гранулометрическому составу, среднего уровня плодородия. Агрохимические показатели: $pH_{\text{сол.}}$ – 4,88 ед.; содержание органического вещества (по методу Тюрина) – 4,54 %; содержание подвижного фосфора и калия (по методу Кирсанова) – соответственно 378,0 и 275,0 мг/кг.

В опыте изучали кратность обработок посевов ярового ячменя РРРР Биосил¹ (100 г/л смеси тритерпеновых кислот) с нормой расхода 0,02 л/га. Препаративная форма – водная эмульсия, в состав которой входит экстракт хвой сибирской пихты.

Схема опыта: 1) контроль (без обработки); 2) однократное опрыскивание посевов РРРР Биосил в фазу «кущение»; 3) двукратное – в фазы «кущение», «выход в трубку»; 4) трехкратное – в фазы «кущение», «выход в трубку», «появление флагового листа».

Опрыскивание проводили ранцевым электрическим опрыскивателем Solo 416 (Германия). Расход рабочей жидкости 300 л/га.

Опыт заложен в 4-кратной повторности с систематическим расположением делянок, учетная площадь – 10 м².

Для проведения исследований взяли районированный в Северном (1), Северо-Западном (2), Центральном (3) и Волго-Вятском (4) регионах сорт ячменя ярового Яромир (патент № 6647) [15] – среднеспелый, вегетационный период составляет 69–87 дней, высота растений достигает 65–75 см. Устойчив к полеганию. Сравнительно устойчив к пыльной головне, слабовосприимчив к пятнистостям листьев.

Посев осуществлен в оптимальные сроки рядовым способом с шириной междурядий 15 см сеялкой ССКФ-7М по предшественнику «чистый пар». Под предпосевную культивацию вносили минеральные удобрения из расчета (NPK)₆₄ д. в. в виде азофоски (N₁₆P₁₆K₁₆).

Протравливание семян и обработку посевов фунгицидными препаратами не проводили. Для обработки посевов от сорной растительности и вредителей использовали баковую смесь гербицидов (Балерина, СЭ – 0,4 л/га + Магнум, ВДГ – 7 г/га) с добавлением инсектицида Борей, СК – 0,1 л/га.

Элементы структуры урожая определяли со снопового материала учетных площадок, взятых с площади 0,25 м² в 4 повторениях. Полевые наблюдения проводили по «Методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур»².

Содержание белка в зерне ячменя определяли на приборе Unity Scientific Spectra Star 2400 (Дания) методом инфракрасной спектроскопии; подсчет массы 1000 зерен осуществляли с помощью автоматического счетчика семян SLY-C Plus (Китай). Анализ структуры урожая и статистическую обработку экспериментальных данных методами дисперсионного и корреляционного анализов проводили по Б. А. Доспехову³ с использованием компьютерных программ Microsoft Office Excel и Diana. Балл устойчивости растений ячменя к развитию болезней и полеганию определяли согласно методическим указаниям⁴ (1 балл – устойчивость очень низкая; 3 – устойчивость низкая; 5 – устойчивость средняя; 7 – устойчивость высокая; 9 – устойчивость очень высокая).

Метеорологические условия мая–июля (по данным метеостанции ИСА – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) за весь период исследований отличались крайней неравномерностью распределения атмосферных осадков и среднесуточных температур воздуха по фазам развития ячменя (рис. 1).

Результаты и их обсуждение. Фенологические наблюдения за ростом и развитием растений ячменя в контрольном и опытных вариантах показали, что особого различия в наступлении фенологических фаз развития культуры, интенсивности окраски листьев, продолжительности вегетационного периода не выявлено.

¹Биосил – экологически безопасный препарат на основе природного компонента тритерпеновых кислот, полученных из хвой пихты сибирской, предназначенный для предпосевной обработки семян и опрыскивания растений в период вегетации. Регулятор роста и развития растений. Оказывает мощное стимулирующее действие на обменные процессы в органах и тканях растения. Ускоряет рост и развитие корневой системы, побегов и листьев, формирование урожая. Укрепляет устойчивость к заболеваниям и неблагоприятным условиям. Ускоряет созревание. Повышает урожай, содержание витаминов и сахаров в плодах и овощах. Особенно эффективен для современных высокопродуктивных сортов и гибридов. Препарат «Биосил» имеет Свидетельство о государственной регистрации пестицида или агрохимиката №2222 от 16 августа 2015 г.

²Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. М.: ООО «Группа Компаний море», 2019. Вып. 1. 384 с.

³Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М., 2012. 352 с.; Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Под ред. В. И. Головачева, Е. В. Кириловской. М., 2019. 194 с.

⁴Методические указания по изучению мировой коллекции ячменя и овса. Сост. М. В. Лукьянова, Н. А. Родионова, А. Я. Трофимовская. Л.: ВИР, 1981. 31 с.

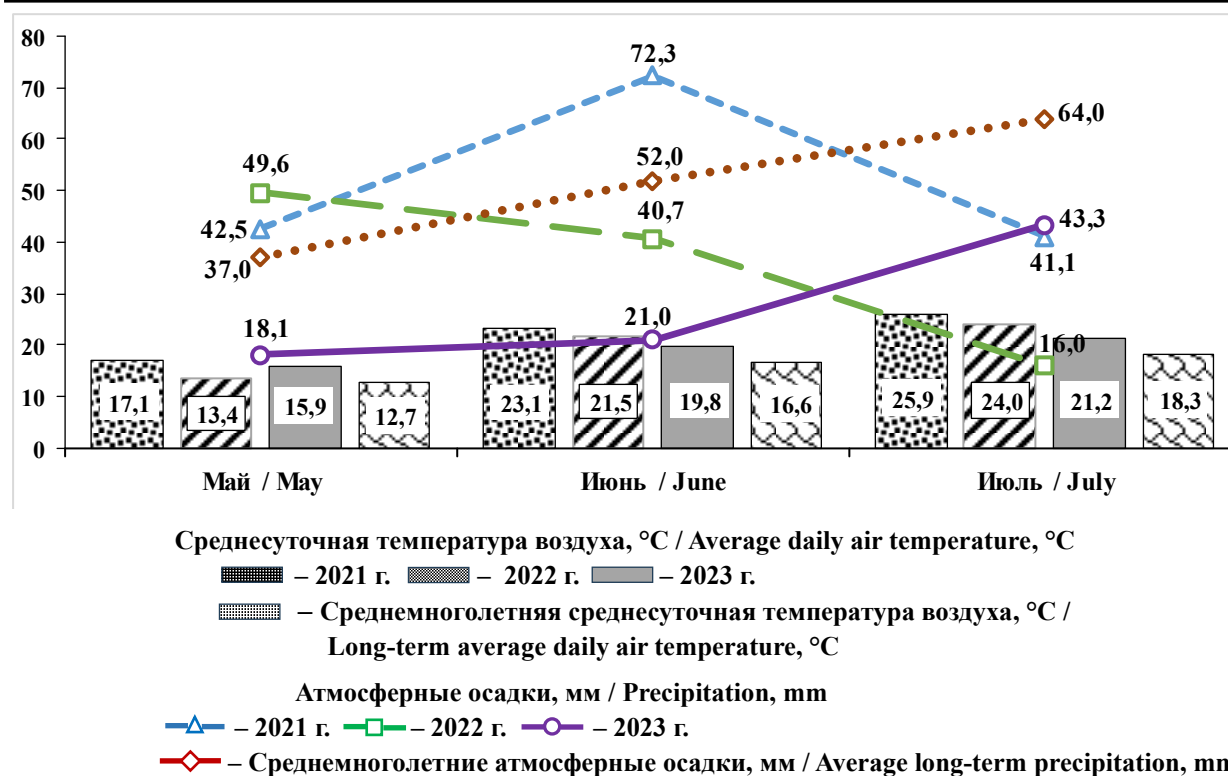


Рис. 1. Метеорологические условия (распределение атмосферных осадков и среднесуточных температур воздуха) в период вегетации ярового ячменя (2021–2023 гг.)

Fig. 1. Meteorological conditions (distribution of precipitation and average daily air temperatures) during the growing season of spring barley (2021–2023)

При определении оптимальной предуборочной густоты установлены показатели полевой всхожести и сохранности растений. В среднем за годы исследований полевая всхожесть ячменя составила 92,6 %.

Установлено, что величина урожая зависела от числа растений, сохранившихся к уборке ($r = 0,709$). Использование РРРР Биосил увеличило сохранность растений относительно контроля от 1,4 % (вариант № 2) до 17,3 % (вариант № 4) (табл. 1). То есть, с увеличением количества опрыскиваний РРРР Биосил уменьшалось самоизреживание посевов ячменя.

Основным показателем того или иного агротехнологического приема является оценка его влияния на продуктивность и количественные показатели испытываемой культуры. При разработке технологии возделывания необходимо учитывать, что урожай формируется за счет различных элементов продуктивности, степень выраженности которых может быть разной. Слабое развитие одного элемента структуры урожая компенсируется за счет других [16, 17]. Установлено, что применение РРРР Биосил не увеличило число продуктивных стеблей с единицы площади и, следовательно,

не повлияло на коэффициент кущения растений. Несмотря на то, что в контрольном варианте наблюдали самую низкую сохранность растений к уборке (58,9 %), наибольшие показатели количества продуктивных стеблей и коэффициента кущения были зафиксированы в контроле – 808 шт/м² и 2,6 соответственно. Меньшее количество растений на единице площади увеличило участок питания в данном варианте (улучшились условия водного, пищевого режимов и других факторов жизнедеятельности растений), что сказалось на увеличении данных структурных элементов по сравнению с другими вариантами опыта. Но важно отметить, что данные компоненты отрицательно сказались на полученной урожайности: коэффициент корреляции урожайности с числом продуктивных стеблей составил -0,361; коэффициент кущения -0,741.

В свою очередь, снижение коэффициента кущения при использовании РРРР Биосил благоприятно повлияло (существенная отрицательная сопряженность) на такие показатели структуры, как длина колоса (-0,949), количество зерен в колосе (-0,913), масса зерна с колоса (-0,999) и масса 1000 зерен (-0,762).

Таблица 1 – Влияние кратности опрыскиваний регулятора роста и развития растений Биосил на элементы продуктивности ячменя ярового сорта Яромир (среднее за 2021–2023 гг.).
Table 1 – The effect of the multiplicity of sprays of the plant growth and development regulator Biosil on the productivity elements of spring barley Yaromir (average for 2021–2023)

Вариант / Variant	Сохранность растений к уборке, % / Safety of plants for harvesting, %	Высота, см / Height, cm	Число продуктивных стеблей, шт./м ² / Number of productive stems, pcs/m ²	Коэффициент кущения / Tilling coefficient	Длина колоса, см / Ear length, cm	Число зерен в колосе, шт. / Number of grains per ear, pcs.	Масса зерна с колоса, г / Grain weight per ear, g	Масса 1000 зерен, г / Weight of 1000 grains, g
1. Контроль (без обработки) / Control (without treatment)	58,9±2,0	74±2,3	808±19	2,6±0,02	7,2±0,17	20,5±0,4	1,17±0,07	53,1±0,5
2. Биосил – однократно / Biosil – once	60,3±2,3	77±3,2	685±31	2,5±0,19	7,2±0,31	21,2±0,2	1,21±0,01	56,2±0,7
3. Биосил – двукратно / Biosil – twice	62,8±1,8	76±2,4	655±29	2,3±0,10	7,3±0,26	21,5±0,1	1,29±0,06	55,5±0,6
4. Биосил – трехкратно / Biosil – three times	76,2±1,4	74±2,2	775±24	2,2±0,10	7,3±0,28	23,1±0,1	1,34±0,04	56,9±0,4
Среднее / Average	64,5±1,9	75,3±0,4	731±18	2,4±0,05	7,3±0,01	21,6±0,3	1,25±0,02	55,4±0,4
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	3,4	2,4	13,6	0,21	0,18	1,4	0,13	0,16
Сопряженность показателей с урожайностью, г / Correlation of indicators with productivity, g								
-	+0,709*	+0,286	-0,361	-0,741*	+0,503*	+0,830*	+0,746*	+0,996*

* Доверительная вероятность $P \geq 0,95$ / *Confidence probability $P \geq 0,95$;

Результаты исследований показали, что обработка посевов РРРР Биосил способствовала увеличению урожайности зерна ячменя ярового (рис. 2), в чем существенную роль на статистически значимом уровне сыграли такие показатели биометрических элементов, как длина колоса ($r = 0,503$), количество зерен в колосе ($r = 0,830$), масса зерна с колоса ($r = 0,746$) и масса 1000 зерен ($r = 0,996$).

Существенное увеличение числа зерен в колосе (23,1 шт.), массы зерна с колоса (1,34 г) и массы 1000 зерен (56,9 г) относительно контрольного варианта на 7,2–12,7 % отмечены в варианте № 4 с трехкратным опрыскиванием посевов (кущение + выход в трубку + появление флагового листа). Соответственно и урожайность в данном варианте была наибольшей по опыту – 8,06 т/га, существенная прибавка к контролю составила 1,38 т/га, или 20,7 %. На втором месте по полученному среднему урожаю – вариант № 2 (единоразовое опрыскивание посевов в фазу «кущение») – 7,78 т/га. Наименьший показатель содержания белка в зерне зафиксирован в варианте № 4 с трехкратным опрыскиванием посевов – 12,6 %; предельные показатели – при однократном опрыскивании в фазу «кущение» (вариант № 2) – 13,3 %.

В наших исследованиях отмечена небольшая фунгицидная активность от применения РРРР Биосил, проявляющаяся в повышении уровня устойчивости к наиболее распространенным в регионе болезням – на 0,2–0,7 балла в сравнении с контролем, и увеличении устойчивости к полеганию на 0,1–0,2 балла (табл. 2).

Урожайность – это основной показатель, определяющий величину стоимости продукции и, следовательно, прибыли и рентабельности. При определении прибыли исходили из сопоставления стоимости дополнительной продукции, полученной от применения РРРР Биосил, с затратами на его использование. Стоимость валовой продукции зависит от рыночной стоимости фуражного зерна ячменя. При расчете на величину урожайности (при продаже 1,0 т фуражного зерна за 8500 рублей) и учете средней стоимости РРРР Биосил (250 руб. за 10 мл препарата в зависимости от производителя в розничных магазинах) стоимость валовой продукции находилась в пределах от 58780 руб/га (вариант № 1, контроль) до 68510 руб/га (вариант № 4) (табл. 3).

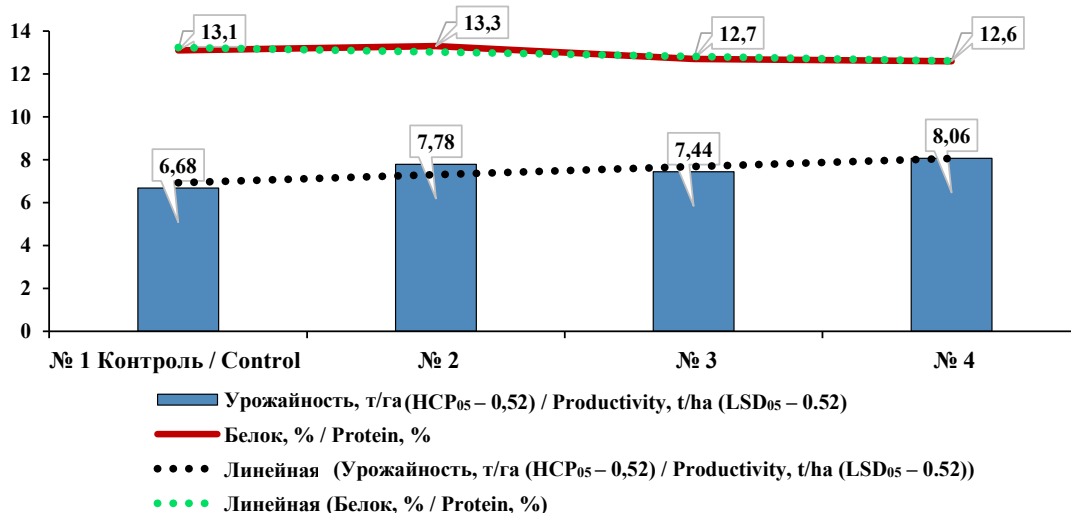


Рис. 2. Влияние кратности опрыскиваний регулятором роста и развития растений Биосил на урожайность и содержание белка в зерне ярового ячменя сорта Яромир: №2 – Биосил однократно; №3 – Биосил двукратно; №4 – Биосил трехкратно (среднее за 2021–2023 гг.)

Fig. 2. The effect of the multiplicity of sprays by the plant growth and development regulator Biosil on yield and protein content in 'Yaromir' spring barley grain: No. 2 – Biosil once; No. 3 – Biosil twice; No. 4 – Biosil three times (average for 2021–2023)

Таблица 2 – Влияние кратности опрыскиваний регулятором роста и развития растений Биосил на устойчивость к полеганию и развитию болезней ячменя ярового сорта Яромир (среднее за 2021–2023 гг.) /

Table 2 – The effect of the multiplicity of sprays by the plant growth and development regulator Biosil on the resistance to lodging and the development of diseases of 'Yaromir' spring barley (average for 2021–2023)

Вариант / Variant	Устойчивость к полеганию, балл / Resistance to lodging, points	Болезни, балл / Diseases, points		
		темно-бурая пятнистость / dark brown spotting	сетчатая пятнистость / mesh spotting	мучнистая роса / powdery mildew
1. Контроль (без обработки) / Control (without treatment)	8,3±0,5	7,7±0,6	6,8±0,3	7,8±0,4
2. Биосил – однократно / Biosil – once	8,5±0,3	8,0±0,4	7,3±0,2	8,0±0,5
3. Биосил – двукратно / Biosil – twice	8,5±0,3	8,0±0,4	7,3±0,2	8,0±0,3
4. Биосил – трехкратно / Biosil – three times	8,4±0,4	8,2±0,5	7,5±0,3	8,1±0,5

Таблица 3 – Влияние кратности опрыскиваний регулятором роста и развития растений Биосил на экономическую эффективность возделывания ячменя сорта Яромир (среднее за 2021–2023 гг.) /

Table 3 – The effect of the multiplicity of sprays by the plant growth and development regulator Biosil on the economic efficiency of cultivating barley of the 'Yaromir' cultivar (average for 2021–2023)

Вариант / Variant	Урожайность, т/га / Productivity, t/ha	Стоимость валовой продукции, руб/га / Cost of gross production, rub/ha	Производственные затраты, руб/га / Production costs, rub/ha	Себестоимость зерна, руб/т / Grain cost, rub/t	Условно чистый доход, руб/га / Conditionally net income, rub/ha	Уровень рентабельности, % / Profitability level, %
1. Контроль (без обработки) / Control (without treatment)	6,68	58780	35839	5365	22941	64,0
2. Биосил – однократно / Biosil – once	7,78	66130	37839	4863	28291	74,8
3. Биосил – двукратно / Biosil – twice	7,44	63240	39839	5354	23401	58,7
4. Биосил – трехкратно / Biosil – three times	8,06	68510	41839	5191	26671	63,7

Себестоимость продукции во всех вариантах опыта была ниже рыночной цены на фуражное зерно ячменя в регионе исследования, что говорит о выгодности возделывания данной культуры. Наименьшая себестоимость получена в варианте № 2 – 4863 руб/т. Увеличение условно чистого дохода в варианте № 2 (однократное опрыскивание PPPP Биосил в фазу «кущение») положительно отразилось на рентабельности производства, имея максимальный по опыту показатель 74,8 %.

Заключение. Таким образом, в ходе обобщенных трехлетних исследований получен положительный результат использования PPPP Биосил по влиянию на урожайность и

ее структурные элементы, содержание белка в зерне ячменя сорта Яромир в условиях Рязанской области на темно-серой лесной почве среднего уровня плодородия. Наивысший показатель урожайности за годы исследований, являющийся главным критерием оценки данного опыта, был достигнут при трехкратном опрыскивании PPPP Биосил в фазы «кущение», «выход в трубку», «появление флагового листа» – 8,06 т/га. При расчете экономической эффективности установлено, что максимальные показатели условно чистого дохода и уровня рентабельности выявили преимущество однократного применения PPPP Биосил в фазу «кущение» культуры при урожайности 7,78 т/га.

Список литературы

1. Тетяников Н. В., Боме Н. А. Анализ взаимодействия «генотип × среда» и оценка адаптивного потенциала ячменя в условиях Северного Зауралья. Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2021;182(3):63–73. DOI: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2021-3-63-73> EDN: SKNLIJ
2. Филиппов Е. Г., Донцова А. А., Донцов Д. П., Брагин Р. Н. Новый раннеспелый сорт ярового ячменя Федос. Зерновое хозяйство России. 2021;(2(74)):11–16. DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2021-74-2-11-16> EDN: ALYYCY
3. Филиппов Е. Г., Донцова А. А., Донцов Д. П., Дорошенко Э. С., Брагин Р. Н., Засыпкина И. М. Сорт ярового ячменя Азимут. Зерновое хозяйство России. 2022;14(5):91–97. DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2022-82-5-91-97> EDN: NGNANE
4. Павловская Н. Е., Гагарина И. Н., Бородин Д. Б., Попова А. Ю. Исследование действия биопрепарата на основе гуматов и микроэлементов на морфометрические показатели и урожайные данные озимой пшеницы. Вестник аграрной науки. 2023;(1(100)):93–99. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2023.1.93> EDN: WDTTPP
5. Алферов А. А. Эффективность применения биопрепаратов на яровой пшенице. Плодородие. 2017;(5):5–8. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30322856> EDN: ZNOKYX
6. Вильдфлуш И. Р., Цыганов А. Р., Мишура О. И., Цыганова А. А. Эффективность применения микроудобрений и регуляторов роста при возделывании сельскохозяйственных культур. Минск: Белорусская наука, 2011. 293 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20245725> EDN: RBAYZH
7. Артемьева А. Е., Захарова М. Н., Рожкова Л. В. Эффективность применения регулятора роста Энергия-М в системе защиты озимой пшеницы. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021;22(6):887–895. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.6.887-895> EDN: WSQDIN
8. Шаповал О. А. Регуляторы роста растений в сельском хозяйстве. Защита и карантин растений. 2019;(4):9–14. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37185625> EDN: ZAZQOT
9. Chaves M. M., Pereira J. S., Maroco J., Rodrigues M. L., Ricardo C. P., Osório M. L., et al. How Plants cope with water stress in the Field Photosynthesis and crown. Annals of Botany. 2002;89(7):907–916. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcf105>
10. Яхин О. И., Лубянов А. А., Яхин И. А. Современные представления о биостимуляторах. Агрохимия. 2014;(7):85–90. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21779483> EDN: SIPPSF
11. Левакова О. В. Биологическая эффективность применения гиббереллиновой кислоты в технологии возделывания рапса ярового в условиях Рязанской области. Аграрный научный журнал. 2023;(2):42–47. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i2pp42-47> EDN: REELWX
12. Догадина М. А., Стебаков В. А., Степанова Е. И., Игнатова Г. А. Эффективность применения современных биологически активных веществ на сое в условиях Орловской области. Вестник аграрной науки. 2023;(4(103)): 33–40. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2023.4.33> EDN: BMNHDR
13. Кирсанова Е. В., Цуканова З. Р., Мельник А. Ф., Смит И. Н. Оценка эффективности применения физиологически активных веществ в семеноводстве гороха. Вестник аграрной науки. 2023;(2(101)):19–28. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2023.2.19> EDN: BLEGYA
14. Долгополова Н. В., Бабаскина А. А. Влияние стимуляторов роста на развитие и продуктивность озимой пшеницы. Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2022;(1):34–41. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48077982> EDN: ZJRJUK
15. Ячмень яровой Яромир. Патентообладатели: ФГБНУ ФИЦ «Немчиновка», ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ». Патент № 6647 от 16.11.2012; зарегистрирован в Государственном реестре охраняемых селекционных достижений 17.11.2010. Режим доступа: <https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni-yaromir-yachmen-yarovoy/>
16. Левакова О. В. Вариативность элементов структуры урожая ярового ячменя в зависимости от гидротермических условий вегетации. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022;23(3):327–333. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.3.327-333> EDN: BSOZZS

17. Лапшин Ю. А., Максимов В. А., Золотарёва Р. И. Влияние агроклиматических условий и минерального питания на зерновую продуктивность ярового тритикале в условиях Республики Марий Эл. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2022;23(3):307–317. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.3.307-317> EDN: SQZMMU

References

1. Tetyannikov N. V., Bome N. A. Analysis of the genotype × environment interactions and assessment of the adaptability potential in barley under the conditions of the Northern Trans-Urals. *Trudy po prikladnoy botanike, genetike i selektsii* = Proceedings on applied botany, genetics and breeding. 2021;182(3):63–73. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30901/2227-8834-2021-3-63-73>
2. Filippov E. G., Dontsova A. A., Dontsov D. P., Bragin R. N. The new early maturing spring barley variety 'Fedos'. *Zernovoe khozyaystvo Rossii* = Grain Economy of Russia. 2021;(2):11–16. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2021-74-2-11-16>
3. Filippov E. G., Dontsova A. A., Dontsov D. P., Doroshenko E. S., Bragin R. N., Zasyapkina I. M. Spring barley variety 'Azimut'. *Zernovoe khozyaystvo Rossii* = Grain Economy of Russia. 2022;14(5):91–97. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2022-82-5-91-97>
4. Pavlovskaya N. E., Gagarina I. N., Borodin D. B., Popova A. Yu. Investigation of the effect of a biological product based on humates and trace elements on morphometric indicators and yield data of winter wheat. *Vestnik agrarnoy nauki* = Bulletin of Agrarian Science. 2023;(1(100)):93–99. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2023.1.93>
5. Alferov A. A. Efficiency of biopreparations for winter wheat. *Plodorodie*. 2017;(5):5–8. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30322856>
6. Vildflus I. R., Tsyganov A. R., Mishura O. I., Tsyganova A. A. The effectiveness of the use of micro fertilizers and growth regulators in the cultivation of crops. Minsk: *Belorusskaya nauka*, 2011. 293 p. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20245725>
7. Artemieva E. A., Zakharova M. N., Rozhkova L. V. The effectiveness of the use of Energia-M growth regulator in the protection system of winter wheat. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2021;22(6):887–895. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.6.887-895>
8. Shapoval O. A. Plant growth regulators in agriculture. *Zashchita i karantin rasteniy*. 2019;(4):9–14. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37185625>
9. Chaves M. M., Pereira J. S., Maroco J., Rodrigues M. L., Ricardo C. P., Osório M. L., et al. How Plants cope with water stress in the Field Photosynthesis and crown. *Annals of Botany*. 2002;89(7):907–916. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcf105>
10. Yakhin O. I., Lubyantsev A. A., Yakhin I. A. Modern concepts on biostimulators. *Agrokhimiya*. 2014;(7):85–90. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21779483>
11. Levakova O. V. Biological efficiency of gibberellic acid application in the technology of spring rapeseed cultivation in the conditions of the Ryazan region. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2023;(2):42–47. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i2pp42-47>
12. Dogadina M. A., Stebakov V. A., Stepanova E. I., Ignatova G. A. Efficiency of the application of modern biologically active substances on soya in the conditions of the Orel region. *Vestnik agrarnoy nauki* = Bulletin of agrarian science. 2023;(4(103)): 33–40. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2023.4.33>
13. Kirsanova E. V., Tsukanova Z. R., Melnik A. F., Smit I. N. Evaluation of the effectiveness of the use of physiologically active substances in pea seed production. *Vestnik agrarnoy nauki* = Bulletin of agrarian science. 2023;(2(101)):19–28. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2587-666X.2023.2.19>
14. Dolgoplova N. V., Babashkina A. A. Effect of growth stimulants for the development and productivity of winter wheat. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* = Vestnik of Kursk State Agricultural Academy. 2022;(1):34–41. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48077982>
15. Yaromir spring barley. Patent holders: Federal State Budgetary Scientific Institution FIT Nemchinovka, Federal State Budgetary Scientific Institution Federal Agroengineering Center VIM. Patent No. 6647 dated 16.11.2012; registered in the State Register of Protected Breeding Achievements 17.11.2010. URL: <https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-selektcionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-k-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/yaromir-yachmen-yarovoy/>
16. Levakova O. V. Variability of the elements of spring barley yield structure depending on the hydrothermal conditions of vegetation. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2022;23(3):327–333. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.3.327-333>
17. Lapshin Yu. A., Maksimov V. A., Zolotareva R. I. The influence of agroclimatic conditions and mineral fertilizers on the grain productivity of spring triticale in the conditions of Mari El Republic. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2022;23(3):307–317. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.3.307-317>

Сведения об авторе

✉ **Ольга Викторовна Левакова**, кандидат с.-х. наук, зав. отделом селекции и первичного семеноводства, Институт семеноводства и агротехнологий – филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», ул. Парковая, 1, с. Подвязье, Рязанский район, Рязанская область, Российская Федерация, 390502, e-mail: podvyaze@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5400-669X>, e-mail: levakova.olga@bk.ru

Information about the author

✉ **Olga V. Levakova**, PhD in Agricultural Science, Head of the Department of Breeding and Primary Seed Production, Institute of Seed Production and Agrotechnologies - branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Agroengineering Center VIM», Parkovaya str., 1, Podvyazye village, Ryazan district, Ryazan region, Russian Federation, 390502, e-mail: podvyaze@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5400-669X>, e-mail: levakova.olga@bk.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

Влияние изменений агроклиматических ресурсов на урожайность гороха в новом климатическом периоде 1991–2020 гг. в условиях Кировской области

© 2025. И. В. Лыскова¹✉, О. Э. Суховеева², С. С. Пислегина¹

¹ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» г. Киров, Российская Федерация

²ФГБУН Институт географии Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация

Исследование посвящено оценке современного состояния агроклиматических ресурсов и их влиянию на урожайность гороха в Фаленском районе Кировской области. Использовали данные Фаленской метеостанции за 1991–2020 гг. (в сравнении с базовым периодом 1961–1990 гг.) и результаты конкурсного сортоиспытания 7 сортов гороха на Фаленской селекционной станции – филиале ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока за 2011–2020 гг. В период 1991–2020 гг. выявлен устойчивый рост температуры воздуха со скоростью 0,44 °C/10 лет, при этом влагообеспеченность осталась на прежнем уровне. Сорта гороха Красноуфимский 93, Рябчик, Северянин, Фаленский усатый, Вита, Фаленский юбилейный, Вятчик, выступавшие объектами исследования, отличались широкой дисперсией урожайности и высокими коэффициентами ее вариации (36,3–55,0 %). В результате кластеризации сорта по урожайности распределили на три группы: первая – одиночный кормовой сорт Вятчик; вторая – пара ценных по качеству и родственным друг другу сортов Фаленский усатый и Фаленский юбилейный; третья – объединяла все остальные сорта. Корреляционный анализ указал на средние отрицательные связи урожайности с температурой воздуха в летний период (–0,402...–0,560) и положительное влияние осадков и увеличения увлажнения (0,455...0,669). Получены значимые регрессионные зависимости урожайности сортов от температуры воздуха в июле, которая определяла 39,4–54,0 % дисперсии продуктивности. По результатам двухфакторного дисперсионного анализа как погодные условия (76,1 %), так и сортовые особенности (6,3 %) оказывали значимое влияние на урожайность гороха.

Ключевые слова: *Pisum sativum* L., зона рискованного земледелия, адаптивная селекция, дисперсионный анализ, кластерный анализ

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 23-26-00191 (<https://rscf.ru/project/23-26-00191/>)

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Лыскова И. В. Суховеева О. Э., Пислегина С. С. Влияние изменений агроклиматических ресурсов на урожайность гороха в новом климатическом периоде 1991–2020 гг. в условиях Кировской области. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(1):48–58. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.48-58>

Поступила: 28.10.2024

Принята к публикации: 27.01.2025

Опубликована онлайн: 26.02.2025

The impact of changes in agro-climatic resources on pea yield in the new climatic period of 1991–2020 in the Kirov region

© 2025. Irina V. Lyskova¹✉, Olga E. Sukhoveeva², Svetlana S. Pislegina¹

¹Federal Agricultural Research Center of the North-East named after N.V. Rudnitsky, Kirov, Russian Federation

²Institute of geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

The study is devoted to assessing the current state of agro-climatic resources and their impact on pea yield in Falenki district of the Kirov region. We used data from the Falenki Meteorological Station for 1991–2020. (in comparison with the base period of 1961–1990) and the results of the competitive variety testing of 7 cultivars of peas at the Falenki Breeding Station, a branch of the for 2011–2020. In the period of 1991–2020, a steady increase in air temperature was detected at a rate of 0.44 °C/10 years, while moisture availability remained at the same level. The pea cultivars ‘Krasnoufimsky 93’, ‘Ryabchik’, ‘Severyanin’, ‘Falensky usatii’, ‘Vita’, ‘Falensky Yubileyny’, ‘Vyatich’, which were the objects of the study, were distinguished by a wide yield dispersion and high coefficients of its variation (36.3–55.0 %). As a result of clustering, the cultivars were divided into three groups according to the yield, one of which was a single feed cultivar ‘Vyatich’, the other was a pair of valuable and related cultivars ‘Falensky Usatii’ and ‘Falensky Jubilee’, the third united all other cultivars. Correlation analysis indicated an average negative relationship between yield and air temperature in summer (–0.402...–0.560) and a positive effect of precipitation and increased humidification (0.455...0.669). Significant regression dependences of crop yields on air temperature in July were obtained, which determined 39.4–54.0 % of the productivity variance. According to the results of a two-factor analysis of variance, both weather conditions (76.1 %) and varietal characteristics (6.3 %) had a significant impact on pea yields.

Keywords: *Pisum sativum* L., zone of risky farming, adaptive breeding, dispersion analysis, cluster analysis

Acknowledgments: the research was carried out under the financial support of the Russian Science Foundation within the scientific project No. 23-26-00191 (<https://rscf.ru/project/23-26-00191/>)

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

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

Forcitation: Lyskova I. V., Sukhovееva O. E., Pislegina S. S. The impact of changes in agro-climatic resources on pea yield in the new climatic period of 1991–2020 in the Kirov region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):48–58. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.48-58>

Received: 28.10.2024

Accepted for publication: 27.01.2025

Published online: 26.02.2025

Официальные информационно-аналитические отчеты по изменению климата^{1,2} неоднократно показывали, что наблюдаемое в последние десятилетия глобальное потепление является серьезным вызовом для устойчивого развития сельского хозяйства, но в то же время отмеченное потепление ведет к увеличению продолжительности вегетационного периода, и с высокой степенью уверенности можно ожидать его положительное воздействие на урожайность сельскохозяйственных культур в некоторых регионах, расположенных в высоких широтах.

В растениеводстве, ориентированном на устойчивый рост урожаев, экологичность, ресурсоэнергоэкономичность и природоохранность, ведущая роль принадлежит селекции [1]. Важнейшим направлением селекционных программ является достижение устойчивости сельскохозяйственных культур к неблагоприятным факторам среды – стрессорам, которые в наибольшей степени ограничивают величину и качество урожая [2]. При этом сорта отличаются потенциалом урожайности и способностью его реализовывать в различных агроклиматических условиях [3, 4]. В такой ситуации единственным эффективным способом повышения продуктивности культур остается замена «старых» сортов на более адаптированные к формирующимся почвенно-климатическим условиям [5].

Кировская область входит в Приволжский федеральный округ, который является одним из основных центров производства зерна – более 30 % валового сбора по стране. В Кировской

области, в связи с преимущественно животноводческой специализацией сельского хозяйства, около половины посевных площадей занято многолетними травами; среди зерновых культур преобладают ячмень, пшеница, озимая рожь, на каждую из которых приходится примерно по 1/10 площади, в меньшем объеме представлены посевы овса, картофеля и гороха³.

Горох – не просто одна из исконных культур, возделываемых в нашей стране более тысячи лет, а одно из самых первых окультуренных человеком растений. По данным ФАО⁴, в последние годы площадь, засеваемая горохом в России, составляет около 1,5 млн га, а урожай превышает 3 млн т, что ставит нашу страну на второе место по производству сухого гороха после Канады.

Одним из селекционных центров, занимающихся выведением новых сортов гороха, является ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока). В Государственный реестр селекционных достижений Российской Федерации на 2024 г. внесены 12 сортов гороха селекции этого учреждения. Наиболее распространенным в производстве в Кировской области из сортов селекции ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока является сорт Фалёнский усатый⁵, районированный с 2010 г.

Цель исследований – оценить современное состояние агроклиматических условий в районе исследований и их влияние на урожайность гороха.

¹Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 г. М., 2024. 104 с.

URL: <https://www.meteorf.gov.ru/images/news/20240329/4/DOCK202344.pdf>

²Шестой оценочный доклад МГЭИК: изменение климата 2022 г. [Электронный ресурс].

URL: <https://www.unep.org/ru/resources/doklad/shestoy-ocenochnyy-doklad-mgeik-izmenenie-klimata-v-2022-godu> (дата обращения 10.10.2024).

³Урожайность сельскохозяйственных культур (в расчете на убранную площадь). ЕМИСС. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/31533> (дата обращения 10.10.2024).

⁴Crops and livestock products. FAOSTAT. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (дата обращения 10.10.2024).

⁵Государственный реестр селекционных достижений. [Электронный ресурс]. URL: <https://gossortrf.ru/registry/> (дата обращения 24.10.2024 г.)

Научная новизна – выявлены изменения агроклиматических условий за период 1991–2020 гг. на территории исследований, расположенной в пределах восточного района центральной агроклиматической зоны Кировской области, установлено влияние основных метеопараметров на показатель «урожайность» сортов гороха различного морфотипа.

Материал и методы. В качестве объектов исследования служили семь сортов гороха, районированных в Волго-Вятском регионе (табл. 1). Данные по урожайности за 2011–2020 гг. взяты из результатов конкурсного сортоиспытания, проведенного сотрудниками лаборатории селекции и первичного семеноводства зернобобовых культур Фалёнской селекционной станции – филиала ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока.

Таблица 1 – Краткая характеристика сортов гороха, включенных в исследование /
Table 1 – Brief description of the pea cultivars included in the study

<i>Copm / Cultivar</i>	<i>Год включения в реестр / Year of inclusion in the registry</i>	<i>Тип листа / Type of the leaf</i>	<i>Срок созревания / Maturation period</i>	<i>Потребительская характеристика / Consumer characteristics</i>
Красноуфимский 93 / 'Krasnoufimskiy 93'	1997	Л / L	СР / ME	Универсальный / Universal
Рябчик / 'Ryabchik'	2007	Л / L	СС / MR	Кормовой (пелюшка) / Feed (pelushka)
Северянин / 'Severyanin'	2007	Л / L	СП / ML	Неосыпающийся, кормовой / Nonshattering, feed
Фаленский усатый / 'Falenskiy usatiy'	2010	БЛ / BL	СС / MR	Ценный по качеству / Valuable in quality
Вита / 'Vita'	2016	Л / L	СС / MR	Индетерминантный, кормовой / Indeterminate, feed
Фаленский юбилейный / 'Falenskiy yubileyniy'	2018	Л / L	СП / ML	Ценный по качеству / Valuable in quality
Вятч / 'Vyatich'	2023	БЛ / BL	СП / ML	Неосыпающийся, кормовой (пелюшка) / Nonshattering, feed (pelushka)

Примечания: Л – листочковый, БЛ – безлисточковый, СР – среднеранний, СС – среднеспелый, СП – среднепоздний /
Notes: L – leafy, BL – leafless, ME – medium early, MR – medium ripe, ML – medium late

Исследования проводили в восточном районе центральной агроклиматической зоны Кировской области на территории Фаленской селекционной станции. Для оценки агроклиматических условий использовали многолетние метеоданные Фалёнской метеостанции (58,3° с. ш., 51,6° в. д., 178 м над уровнем моря) за 1991–2020 гг. в сравнении с соответствующими показателями за 1961–1990 гг. (базовый период, принятый Всемирной метеорологической организацией⁶). Для оценки влияния

метеоусловий на урожайность гороха отдельно рассматривали период 2011–2020 гг.

Почва опытного участка – дерново-подзолистая среднесуглинистая, рН солевой вытяжки пахотного слоя 4,4–5,4 ед. (на иономере ЭВ-74⁷), содержание гумуса (по Тюрину⁸) 2,03–2,78 %, подвижного фосфора и обменного калия (по Кирсанову⁹) 236–373 и 178–242 мг/кг соответственно. Агрофон: под культивацию перед посевом вносили нитроаммофоску (N₆P₂₀K₃₀) в дозе 3,0 ц/га. Предшественник – картофель.

⁶Руководящие указания ВМО по расчету климатических норм. ВМО. 2017. № 1203. [Электронный ресурс]. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4168 (дата обращения 10.07.2024).

⁷ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее рН по методу ЦИНАО. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1985. 6 с.

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

⁸ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. Определение органического вещества по методу Тюрина в модификации ЦИНАО. М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1992. 6 с.

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

⁹ГОСТ 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>

Рассчитаны основные агроклиматические параметры тепло- и влагообеспеченности: суммы среднесуточных температур выше 0 и 10 °С, индекс сухости Будыко, гидротермический коэффициент Селянинова, коэффициент увлажнения Сапожниковой. При расчете биоклиматического потенциала (БКП) по формуле Шашко в качестве показателя увлажнения использовали коэффициент увлажнения Сапожниковой [6], а в качестве базисной суммы температур была выбрана 1900 °С как эталон для южно-таежно-лесной зоны [7].

Для статистической оценки урожайности и влияния на нее погодных условий использовали корреляционный, регрессионный, двухфакторный дисперсионный и кластерный

методы анализа, выполняемые в программах Microsoft Excel 2010 и PAST.

Результаты и их обсуждение. Основные метеопараметры за 30-летний период (1991–2020 гг.), рассчитанные по данным Фаленской метеостанции и экстраполируемые на восточный район центральной агроклиматической зоны Кировской области представлены в таблице 2. Среди всех полученных показателей устойчивый тренд зафиксирован только для среднегодовой температуры воздуха (рис. 1), которая в 1991–2020 гг. увеличивалась со скоростью 0,44 °С/10 лет. Эта оценка сопоставима со средними темпами роста температуры по стране (0,51 °С/10 лет) и Приволжскому федеральному округу (0,49 °С/10 лет) за 1976–2020 гг.¹⁰.

Таблица 2 – Агроклиматические ресурсы территории исследований (восточный район центральной агроклиматической зоны Кировской области) за 1991–2020 гг. /

Table 2 – Agro-climatic resources of the research area (eastern district of the central agro-climatic zone of the Kirov region) for 1991–2020

Теплообеспеченность, °С / Heat supply, °С		Влагообеспеченность, мм / Moisture availability, mm	
Среднегодовая температура воздуха / Average annual air temperature	2,8±0,8	Годовое количество осадков / Annual precipitation	634±79
Сумма положительных температур / The sum of positive temperatures (>0 °С)	2421±184	Осадки теплого периода / Precipitation of the warm period	348±67
Сумма активных температур / Sum of active temperature tours (>10 °С)	1981±186	Осадки за июнь-август / Precipitation in June-August	213±57
Сумма температур за июнь-август / The sum of temperatures for June-August	1520±105	Индекс сухости Будыко / Budyko Dryness Index	0,57±0,09
Температура июня / June temperature	15,9±1,8	Гидротермический коэффициент Селянинова / Selyaninov hydrothermal coefficient	1,42±0,42
Температура июля / July temperature	18,3±1,9	Коэффициент увлажнения Сапожниковой / Sapozhnikova moisture coefficient	1,22±0,21

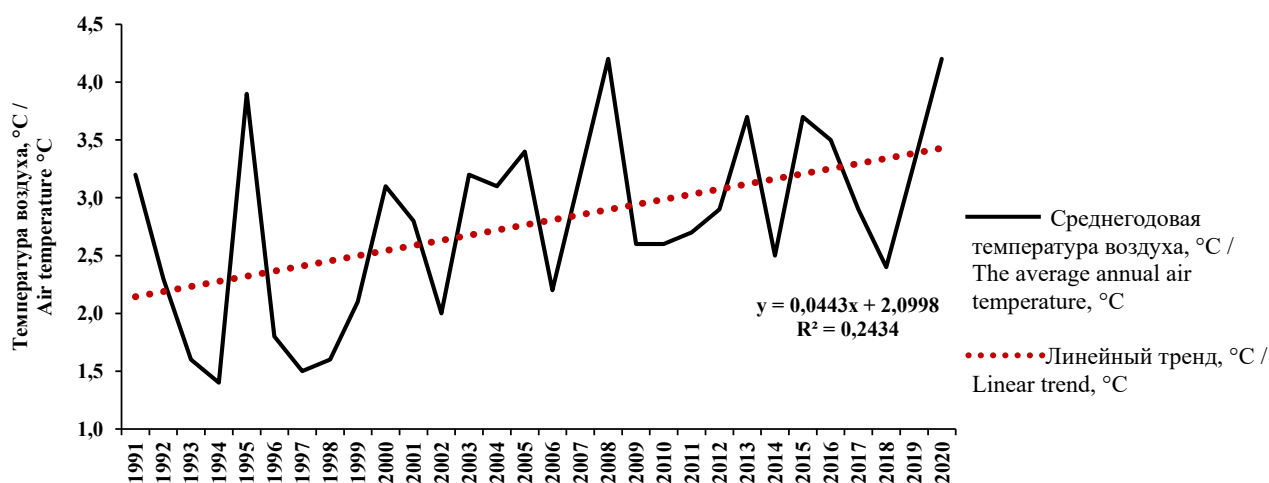


Рис. 1. Динамика среднегодовых температур воздуха за 1991–2020 гг. в районе исследований /
Fig. 1. Dynamics of average annual air temperatures in the research area for 1991–2020

¹⁰ URL: <https://www.meteorf.gov.ru/press/news/23886/> (дата обращения 30.09.2024).

Сумма активных температур выше 10°C в Фаленском районе в 1968–2007 гг. составляла 1814°C [8], за 1991–2020 гг. она увеличилась до $1981 \pm 186^{\circ}\text{C}$. При этом ГТК Селянинова остался равным базовому периоду $1,42 \pm 0,42$, что соответствует достаточному и периодически избыточному увлажнению. Следовательно, в районе исследований наблюдается общая тенденция к повышению теплообеспеченности при неравномерном характере увлажнения. Балльная оценка биоклиматического потенциала (БКП) по формуле Шашко за 1991–2020 гг. составила $1,26 \pm 0,19$, что находится на нижней границе интервала (1,21–1,60), соответствующего пониженной биологической продуктивности [7].

Анализ метеопараметров за вегетационный период по десятилетиям в сравнении со среднемноголетними значениями 1961–1990 гг. приведен в таблицах 3 и 4. В первом анализируемом периоде (1991–2000 гг.) в мае и августе среднее отклонение температуры воздуха в год составило отрицательные значения с максимальной амплитудой от $-4,5$ до $+3,1^{\circ}\text{C}$ в мае и минимальной в августе $-1,4 \dots +0,8^{\circ}\text{C}$. При этом в июне зафиксировано наибольшее среднее отклонение в год $+1,42^{\circ}\text{C}$ и соответственно преобладание количества лет с положительными отклонениями от среднемноголетней нормы. В целом период условной вегетации растений был теплее всего на $0,1^{\circ}\text{C}$. Количество выпавших осадков в данный период за май–август увеличилось на $33,6$ мм/год, большее увеличение зафиксировано в июне, в июле, наоборот, произошло снижение, в этом же месяце отмечена и наибольшая амплитуда отклонений

от среднемноголетних значений (в 1994 г. количество выпавших осадков за июль составило 228% к норме базового периода).

В последующем периоде (2001–2010 гг.) наблюдали увеличение температурного режима в целом за май–август до $+0,8^{\circ}\text{C}$ в среднем в год, из четырех месяцев в этот период только июнь был холоднее на $0,11^{\circ}\text{C}$ в среднем в год. Самым жарким сложился 2010 г. – отклонение за май–август составило $+3,2^{\circ}\text{C}$. Количество осадков в данном периоде увеличилось незначительно – всего на $5,6$ мм в год, в июле осадков выпало еще меньше, чем в предыдущий период. В июне и августе отклонения в сторону увеличения были равными.

Третий анализируемый период (2010–2020 гг.) – теплее предыдущего в большей степени за счет мая, среднее отклонение температуры воздуха в год составило $+1,5^{\circ}\text{C}$. Наибольшее отклонение амплитуды с положительными значениями (до $+6,0^{\circ}\text{C}$) зафиксировано в августе 2016 г. ($+20,9^{\circ}\text{C}$), этот год был самым жарким в рассматриваемом периоде (отклонение за май–август $+3,0^{\circ}\text{C}$). Сохранилось отклонение в сторону снижения количества осадков в июле (за исключением 2017 г., когда выпало 187% за месяц к норме базового периода), а также в мае ($-5,45$ мм/год). В целом за условную вегетацию только 4 года из 10 были ниже нормы по осадкам, из них 2013 и 2016 гг. с дефицитом более 100 мм.

Урожайность сортов гороха в конкурсном сортоиспытании за 2011–2020 гг. отличалась высокой вариабельностью и отсутствием значимого тренда (рис. 2).

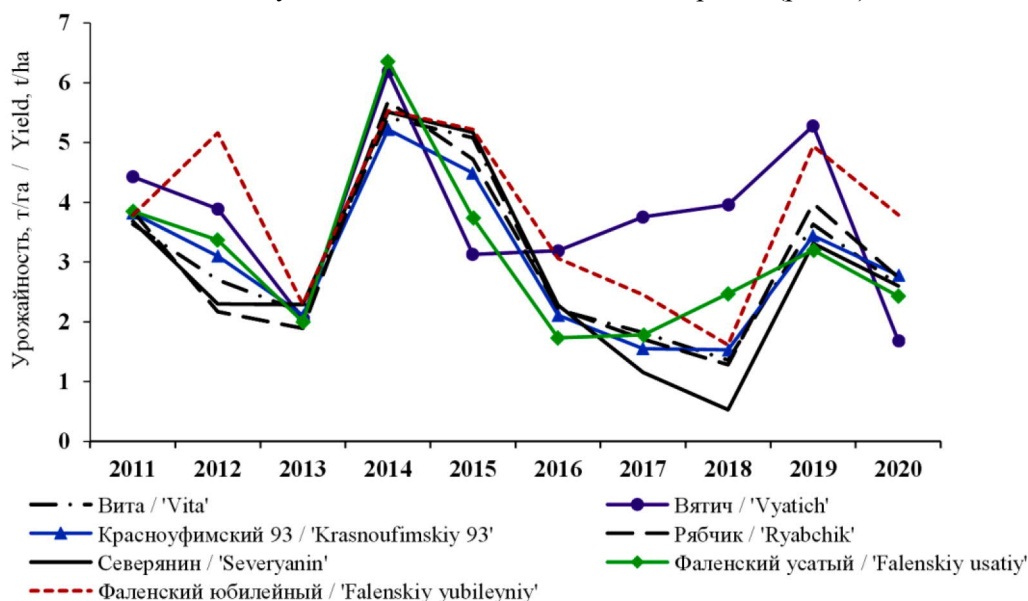


Рис. 2. Динамика урожайности сортов гороха в конкурсном сортоиспытании (2011–2020 гг.) /
Fig. 2. Dynamics of pea cultivars yield in competitive variety testing (2011–2020)

Таблица 3 – Анализ изменений среднесуточной температуры воздуха за период 1991–2020 гг., °C (по данным Фалёнской метеостанции) /
Table 3 – Analysis of changes in the average daily air temperature for the period of 1991–2020, °C (according to the data of the Falenki Meteorological Station)

Показатель / Indicator	Отклонение среднесуточной температуры воздуха от среднесезонной нормы / Deviation of the average daily air temperature from the long-term average norm					
	май (10,6°) / may (10,6°)	июнь (15,3) / june (15,3)	июль (17,7) / july (17,7)	август (14,9) / august (14,9)	май-август (14,6) / may-august (14,6)	май-август (14,6) / may-august (14,6)
1991–2000 гг.						
Интервал отклонений / Deviation interval	-4,5...+3,1	-1,8...+4,1	-2,2...+3,4	-1,4...+0,8	-1,5...+1,5	-1,5...+1,5
Среднее отклонение в год / Average deviation per year	-0,52	+1,42	+0,08	-0,56	+0,10	+0,10
Количество лет с отрицательными/положительными отклонениями** / Number of years with negative/positive deviations**	5/5	2/8	5/5	8/2	4/6	4/6
2001–2010 гг.						
Интервал отклонений / Deviation interval	-3,1...+4,2	-2,5...+3,6	-1,7...+4,0	-3,4...+3,6	-1,2...+3,2	-1,2...+3,2
Среднее отклонение в год / Average deviation per year	+1,13	-0,11	+1,10	+1,01	+0,80	+0,80
Количество лет с отрицательными/положительными отклонениями** / Number of years with negative/positive deviations**	2/8	7/3	3/7	2/8	1/9	1/9
2011–2020 гг.						
Интервал отклонений / Deviation interval	-3,1...+3,8	-1,3...+3,1	-2,8...+2,8	-1,9...+6,0	-0,8...+3,0	-0,8...+3,0
Среднее отклонение в год / Average deviation per year	+1,50	+0,49	+0,65	+1,06	+1,00	+1,00
Количество лет с отрицательными/положительными отклонениями** / Number of years with negative/positive deviations**	2/8	5/5	4/6	3/7	2/8	2/8

* Среднесезонная норма за базовый период 1961–1990 гг., ** в числителе – количество лет за десятилетие с отрицательными отклонениями средней температуры от среднесезонной нормы, в знаменателе – с положительными /
* Average annual norm for the base period of 1961–1990, ** in the numerator, the number of years per decade with negative deviations of the average temperature from the average annual norm, in the denominator – with positive

Таблица 4 – Анализ изменений количества осадков в месяц за период 1991–2020 гг., мм (по данным Фалёнской метеостанции) /
Table 4 – Analysis of changes in precipitation per month for the period of 1991–2020, mm (according to the data of the Falenki Meteorological Station)

Показатель / Indicator	Отклонение суммы осадков от среднесезонной нормы / Deviation of precipitation sum from the annual average norm					
	май (45°) / may (45°)	июнь (57) / june (57)	июль (85) / july (85)	август (57) / august (57)	май-август (244) / may-august (244)	май-август (244) / may-august (244)
1991–2000 гг.						
Интервал отклонений / Deviation interval	-17,7...+53,8	-18,2...+66,2	-76,7...+108,9	-31,2...+88,0	-71,3...+182,6	-71,3...+182,6
Сумма отклонений за период, мм/год / The amount of deviations for the period, mm/year	+3,48	+23,36	-8,6	+15,9	+33,6	+33,6
Количество лет с отрицательными/положительными отклонениями** / Number of years with negative/positive deviations**	5/5	1/9	8/2	5/5	5/5	5/5
2001–2010 гг.						
Интервал отклонений / Deviation interval	-24,7...+54,5	-18,8...+72,8	-75,0...+50,6	-18,6...+89,2	-60,5...+74,6	-60,5...+74,6
Сумма отклонений за период, мм/год / The amount of deviations for the period, mm/year	+0,57	+18,71	-31,65	+17,96	+5,60	+5,60
Количество лет с отрицательными/положительными отклонениями** / Number of years with negative/positive deviations**	4/6	3/7	8/2	4/6	5/5	5/5
2011–2020 гг.						
Интервал отклонений / Deviation interval	-36,1...+20,1	-11,2...+51,0	-37,1...+73,9	-42,0...+100,2	-105,3...+129,5	-105,3...+129,5
Сумма отклонений за период, мм/год / The amount of deviations for the period, mm/year	-5,45	+16,63	-9,12	+13,15	+15,2	+15,2
Количество лет с отрицательными/положительными отклонениями** / Number of years with negative/positive deviations**	6/4	3/7	9/1	6/4	4/6	4/6

* Среднесезонная норма за базовый период 1961–1990 гг., ** – в числителе количество лет за десятилетие с отрицательными отклонениями суммы осадков от среднесезонной нормы, в знаменателе – с положительными /
* Average annual norm for the base period of 1961–1990, ** in the numerator, the number of years per decade with negative deviations of the average precipitation from the average annual norm, in the denominator – with positive

На рисунке 3 сорта ранжированы по возрастанию средней урожайности. Можно заметить, что дисперсия ее довольно велика, а средние значения выше медианных, что

говорит о положительной асимметрии распределения урожайности, когда в ней присутствует малое количество высоких значений.

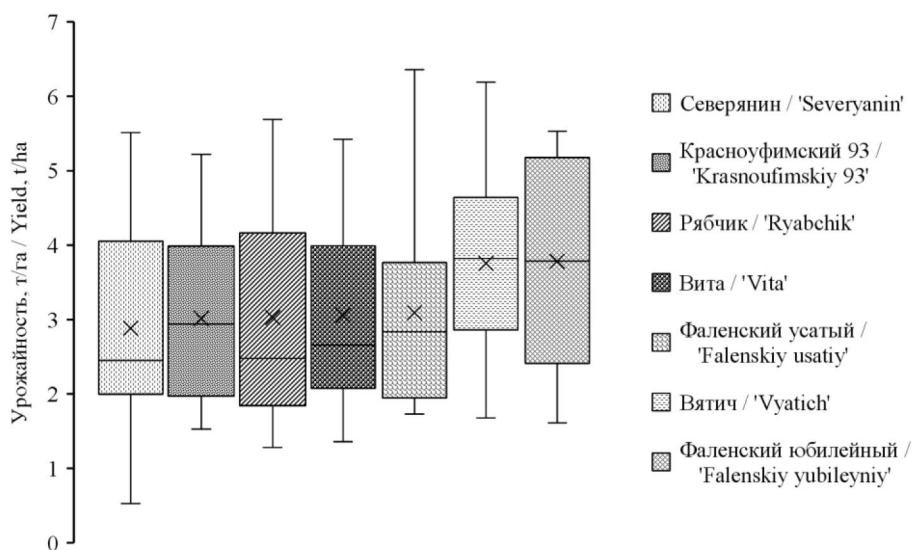


Рис. 3. Урожайность сортов гороха в конкурсном сортоиспытании, 2011–2020 г. (крестик – среднее, линия – медиана, ящик – верхний и нижний квартили, «усы» – дисперсия значений) /

Fig. 3. Yield of pea cultivars in competitive variety testing, 2011–2020 (cross – average, line – median, box – upper and lower quartiles, «whiskers» – variance of values)

Классический кластерный анализ по методу Варда (рис. 4) показал, что сорта по показателю «урожайность» можно разделить на три кластера. Особняком выделен новый сорт Вятч (допущенный в производство с 2023 г.), коэффициент вариации урожайности которого наименьший среди анализируемых – 36,3 %. Это объясняется отличным сочетанием элементов продуктивности этого сорта по сравнению со стандартом (в качестве которого в Кировской области выступает сорт Рябчик): число бобов и зёрен на одном растении больше стандарта на 0,9 и 4,1 шт. соответственно,

число бобов на плодоносном узле больше на 0,3 шт., масса семян с растения больше на 0,4 г [9]. Интересен кластер, объединяющий сорта Фаленский усатый и Фаленский юбилейный, важно отметить, что первый сорт выступает материнской формой для второго (коэффициент вариации урожайности 44,9 и 37,0 % соответственно). Остальные сорта (ранее созданные) расположены тесно друг к другу и объединены в один кластер, что говорит также об их схожести по данному показателю (коэффициенты вариации 41,2–55,0 %).

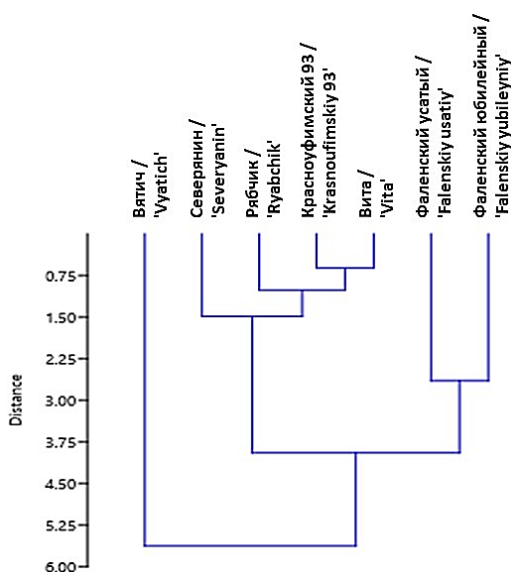


Рис. 4. Кластерный анализ сортов гороха по показателю «урожайность» в конкурсном сортоиспытании (2011–2020 гг.)

Fig. 4. Cluster analysis of pea cultivars according to the "yield" indicator in a competitive variety test (2011–2020)

Высокая вариабельность урожайности и отсутствие тренда не позволяют рассчитать климатически обусловленную урожайность [10]. Поэтому нами был применен двухфакторный дисперсионный анализ. Для выборки, содержащей урожайность семи сортов гороха за десять лет, оценивалось влияние факторов «сорт» и «год» (табл. 5). Анализ показал значимое досто-

верное влияние на урожайность как сортовых особенностей, так и погодных условий ($F > F_{критич}$; $p < 0,05$). Исходя из значений сумм квадратов, было рассчитано, что урожайность гороха преимущественно определялась погодными условиями – на 76,1 % ($100,66 \times 100/132,27$), тогда как на долю особенностей сорта приходилось лишь 6,3 % ($8,39 \times 100/132,27$) дисперсии.

Таблица 5 – Результаты дисперсионного анализа по выявлению влияния факторов «сорт» и «год» на урожайность гороха (2011–2020 гг.) /

Table 5 – The results of the analysis of variance to identify the influence of the factors "cultivar" and "year" on the yield of peas (2011–2020)

Источник вариации / Source of variation	SS	df	MS	F	$F_{критич}$	p-value
Сорт / Cultivar	8,39	6	1,40	3,25	2,27	0,008
Год / Year	100,66	9	11,18	26,00	2,06	<0,001
Погрешность / Error	23,23	54	0,43	-	-	-
Итого / Total	132,27	69	-	-	-	-

По результатам корреляционного анализа (табл. 6) прослеживается негативное воздействие роста летних температур на урожайность всех анализируемых сортов, что доказывается отрицательными корреляциями средней и сильной степени с температурой воздуха в июле и суммой температур за июнь–август. В связи с этим некоторые авторы утверждают, что необходимо создание сортов яровых

культур, более устойчивых к повышенным температурам [11]. Для снижения отрицательного воздействия высоких температур в период формирования генеративных органов у гороха предлагается включать в схемы скрещивания индетерминантные сорта, отличающиеся продолжительным цветением, для получения новых генотипов, более устойчивых к изменяющимся условиям среды [12].

Таблица 6 – Корреляционный анализ зависимости урожайности сортов гороха от погодных условий за 2011–2020 гг. /

Table 6 – Correlation analysis of the dependence of pea cultivars yield on weather conditions in 2011–2020

Copt / Cultivar	Температура июля / July temperature	Температура за июнь-август / Temperature for June-August	Осадки за июнь- август / Precipita- tion in June-August	ГТК Селянинова / HTC Selyaninov
Вита / 'Vita'	-0,735	-0,525	0,493	0,537
Вятч / 'Vyatich'	-0,499	-0,468	0,507	0,524
Красноуфимский 93 / 'Krasnoufimskiy 93'	-0,627	-0,469	0,483	0,505
Рябчик / 'Ryabchik'	-0,701	-0,560	0,435	0,499
Северянин / 'Severyanin'	-0,653	-0,402	-	-
Фаленский усатый / 'Falenskiy usatiy'	-0,554	-0,432	0,455	0,455
Фаленский юбилейный / 'Falenskiy yubileyniy'	-0,652	-0,495	0,671	0,669

Примечания: Отмечены значимые корреляции ($r > 0,4$, $p < 0,05$), прочерк означает отсутствие значимых корреляций /
 Notes: Significant correlations were noted ($r > 0,4$, $p < 0,05$), the dash indicates the absence of significant correlations

В то же время осадки летнего периода и рост увлажнения вегетационного периода (судя по ГТК Селянинова) оказывают благоприятное воздействие на продуктивность культуры. Действительно, ранее было установлено

[13], что в наиболее ответственный период роста гороха, который приходится на июнь–первую декаду июля, высокая урожайность (более 2,5 т/га) обеспечивалась при сумме осадков в диапазоне 60–165 мм.

Важно отметить, что в районе исследований начало сева гороха предопределялось именно влажностью почвы, т. е. количеством осадков, выпавших в мае. Более того, было установлено, что количество выпавших осадков влияет на продолжительность вегетационного периода (от всходов до созревания) этой культуры (коэффициент корреляции – 0,71–0,76). Например, у сорта Рябчик самый короткий вегетационный период (57 суток) отмечен в 2013 г., когда выпало всего 57 мм осадков, а наиболее длительный (92 суток) – в 2019 г. при 269 мм осадков [14].

Значимая регрессионная зависимость урожайности гороха от тех погодных факторов,

которые были выделены в корреляционном анализе, была получена только для температуры воздуха в июле (табл. 7), которая объясняет 39,4–54,0 % дисперсии. Эти оценки ниже, чем те, что были получены в результате двухфакторного дисперсионного анализа, но полностью совпадают с оценками других исследователей, которые определяли долю влияния погодного фактора 39–55 % [15, 16]. Важно обратить внимание на то, что в нашем случае коэффициент при переменной отрицательный – это подтверждает негативное влияние повышения температуры воздуха на продуктивность культуры.

Таблица 7 – Регрессионная зависимость урожайности сортов гороха от температуры воздуха в июле (2011–2020 гг.) /

Table 7 – Regression dependence of pea yield on air temperature in July (2011–2020)

<i>Сорт / Cultivar</i>	<i>Коэффициент детерминации / Coefficient of determination, R²</i>	<i>Значимость / p-value</i>	<i>Уравнение / Equation</i>
Вита / 'Vita'	0,540	0,015	$Y = 11,321 - 0,450x$
Вятч / 'Vyatich'	0,249	0,142	Зависимость не значима / Dependence is not significant
Красноуфимский 93 / 'Krasnoufimskiy 93'	0,394	0,052	$Y = 9,470 - 0,352x$
Рябчик / 'Ryabchik'	0,491	0,024	$Y = 11,467 - 0,460x$
Северянин / 'Severyanin'	0,426	0,041	$Y = 11,444 - 0,467x$
Фаленский усатый / 'Falenskiy usatiy'	0,307	0,096	Зависимость не значима / Dependence is not significant
Фаленский юбилейный / 'Falenskiy yubileyniy'	0,426	0,041	$Y = 11,332 - 0,411x$

У сортов Вятч и Фаленский усатый, которые относятся к безлисточковым, не было получено ни одной значимой регрессионной зависимости. Можно предположить, что их урожайность полностью определяется особенностями сорта и неучтенными факторами.

Заключение. При оценке изменений агроклиматических условий на территории исследований, расположенной в пределах восточного района центральной агроклиматической зоны Кировской области, выявлено, что по сравнению с базовым периодом 1961–1990 гг. в последующее тридцатилетие (1991–2020 гг.) наблюдался устойчивый рост температуры воздуха со скоростью 0,44 °C/10 лет; ГТК Селянинова остался равным 1,42±0,42, что соответствует достаточному и периодически избыточному увлажнению. Урожайность сортов гороха отличалась широкой дисперсией и высоким варьированием (36,3–55,0 %). При кластери-

зации по урожайности сорта распределились на три группы: первая – новый сорт Вятч (районированный с 2023 г.); вторая – ценные по качеству и родственные друг другу сорта Фаленский усатый и Фаленский юбилейный (районированные в 2010 и в 2018 гг. соответственно); третья – Красноуфимский 93, Северянин, Рябчик и Вита, созданные в более ранние периоды. Проведенный корреляционный анализ показал на средние отрицательные связи урожайности с температурой воздуха в летний период (-0,402...-0,560) и положительное влияние осадков и увеличения увлажнения на рост продуктивности гороха (0,455...0,669). Регрессионный анализ выявил, что температура воздуха в июле, как наиболее значимый погодный фактор, на 39,4–54,0 % объясняла дисперсию урожайности рассматриваемых сортов. По результатам двухфакторного дисперсионного анализа совокупные условия года

определяли 76,1 % дисперсии продуктивности, тогда как на долю сортовых особенностей приходилось лишь 6,3 %.

Таким образом, колебания тепло- и влагообеспеченности будут дестабилизировать

урожайность и элементы структуры урожая гороха. Тем не менее ожидается, что индетерминантные и безлисточковые сорта гороха, менее зависимые от погодных условий, смогут реализовать свой потенциал продуктивности.

Список литературы

1. Жученко А. А. Эколого-генетические основы адаптивной системы селекции растений. Сельскохозяйственная биология. 2000;25(3):3–29.
2. Волкова Л. В., Лисицын Е. М., Амунова О. С. Роль генотипа и погодных условий в формировании морфобиологических и хозяйственно ценных признаков яровой мягкой пшеницы. Таврический вестник аграрной науки. 2020;(3(23)):43–58. DOI: <https://doi.org/10.33952/2542-0720-2020-3-23-43-58> EDN: GNVAQG
3. Ленточкин А. М., Бабайцева Т. А. Глобальное потепление и изменение условий ведения растениеводства в Среднем Предуралье. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021;22(6):826–834. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.6.826-834> EDN: VWIIZQ
4. Зотиков В. И., Вилунов С. Д. Современная селекция зернобобовых и крупяных культур в России. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2021;25(4):381–387. DOI: <https://doi.org/10.18699/VJ21.041> EDN: FAXQBC
5. Щенникова И. Н., Кокина Л. П. Перспективы селекции ячменя для условий Волго-Вятского региона (аналитический обзор). Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021;22(1):21–31. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.1.21-31> EDN: QWJWHD
6. Сиротенко О. Д., Павлова В. Н. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012. С. 165–189.
7. Ермакова Л. Н., Толмачева Н. И., Безматерных Е. А. Оценка агроклиматических ресурсов территории Пермского края. Географический вестник. 2010;(2(13)):52–58. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15569347> EDN: NCSHUI
8. Френкель М. О., Переведенцев Ю. П., Соколов В. В. Климатический мониторинг Кировской области. Казань: Казанский университет, 2012. 264 с.
9. Пислегина С. С., Четвертных С. А. Новый сорт гороха полевого Вятч. Агропромышленные технологии Центральной России. 2020;(4(18)):64–71. DOI: <https://doi.org/10.24888/2541-7835-2020-18-64-71> EDN: ПКCFA
10. Павлова В. Н., Караченкова А. А. Оценка изменений климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы в земледельческой зоне России. Фундаментальная и прикладная климатология. 2020;4:68–87. DOI: <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2020-4-68-87> EDN: ZPJXZF
11. Щенникова И. Н. Влияние погодных условий на рост и развитие растений ячменя в Кировской области. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2014;(4(41)):9–12. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21699652> EDN: SGWETZ
12. Bueckert R. A., Wagenhoffer S., Hnatowich G., Warkentin T. D. Effect of heat and precipitation on pea yield and reproductive performance in the field. Canadian Journal of Plant Science. 2015;95(4):629–639. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjps-2014-34>
13. Вавилова З. И. Новые направления в селекции гороха на северо-востоке европейской части России. Почвы и приемы повышения эффективности их использования. Киров: Вятская ГСХА, 2008. С. 128–131.
14. Пислегина С. С., Четвертных С. А. Влияние погодных условий на продолжительность вегетационного периода и продуктивность гороха. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020;21(5):521–530. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.5.521-530> EDN: LXXCDH
15. Павлова В. Н., Караченкова А. А. Изменение агроклиматических ресурсов зернопроизводящих регионов России и продуктивности зерновых культур в новом климатическом периоде 1991–2020 гг. Метеорология и гидрология. 2023;(9):29–42. DOI: <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-9-29-42> EDN: EPVMPD
16. Волкова Л. В., Щенникова И. Н. Сравнительная оценка методов расчета адаптивных реакций зерновых культур. Теоретическая и прикладная экология. 2020;(3):140–146. DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-3-140-146> EDN: ORZBYL

References

1. Zhuchenko A. A. Ecological and genetic foundations of adaptive plant breeding system. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2000;25(3):3–29. (In Russ.).
2. Volkova L. V., Lisitsyn E. M., Amunova O. S. Role of genotype and weather conditions in the formation morphobiological and economically valuable traits of spring soft wheat. *Tavrisheskiy vestnik agrarnoy nauki* = Taurida herald of the agrarian sciences. 2020;(3(23)):43–58. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33952/2542-0720-2020-3-23-43-58>
3. Lentochkin A. M., Babaytseva T. A. Global warming and change in the conditions of crop production practices in the Middle Cis-Urals. *Agrarnaya nauka Euro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2021;22(6):826–834. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.6.826-834>
4. Zotikov V. I., Vilyunov S. D. Present-day breeding of legumes and groat crops in Russia. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i seleksii* = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2021;25(4):381–387. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18699/VJ21.041>

5. Shchennikova I. N., Kokina L. P. Perspectives of barley breeding for the conditions of the Volgo-Vyatka region (analytical review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2021;22(1):21–31. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.1.21-31>
6. Sirotenko O. D., Pavlova V. N. Methods for assessing the impact of climate change on agricultural productivity. Methods for assessing the effects of climate change on physical and biological systems. Moscow: *Rosgidromet*, 2012. pp. 165–189.
7. Ermakova L. N., Tolmacheva N. I., Bezmaternykh E. A. The evaluation of agro-climatic resources within the territory of Perm region. *Geograficheskiy vestnik* = Geographical Bulletin. 2010;(2(13)):52–58. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15569347>
8. Frenkel' M. O., Perevedentsev Yu. P., Sokolov V. V. Climate monitoring of the Kirov region. Kazan': *Kazanskiy universitet*, 2012. 264 p.
9. Pislegina S. S., Chetvertnykh S. A. New variety of field peas Vyatich. *Agropromyshlennye tekhnologii Tsentral'noy Rossii* = Agro Central Russian Technologies. 2020;(4(18)):64–71. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24888/2541-7835-2020-18-64-71>
10. Pavlova V. N., Karachenkova A. A. Assessment of changes in climate-based productivity of summer wheat in the main regions of its cultivation in Russia. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya* = Fundamental and Applied Climatology. 2020;4:68–87. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2020-4-68-87>
11. Shchennikova I. N. Influence of weather conditions on growth and development of barley plants in Kirov region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2014;(4(41)):9–12. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21699652>
12. Bueckert R. A., Wagenhoffer S., Hnatowich G., Warkentin T. D. Effect of heat and precipitation on pea yield and reproductive performance in the field. *Canadian Journal of Plant Science*. 2015;95(4):629–639. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjps-2014-34>
13. Vavilova Z. I. New directions in pea breeding in the north-east of the European part of Russia. Soils and techniques for increasing the efficiency of their use. Kirov: *Vyatskaya GSKhA*, 2008. pp. 128–131.
14. Pislegina S. S., Chetvertnykh S. A. Influence of weather conditions on the duration of the growth season and yield of peas. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2020;21(5):521–530. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2020.21.5.521-530>
15. Pavlova V. N., Karachenkova A. A. Changes in agroclimatic resources of grain-producing regions of Russia and grain productivity during the new reference period of 1991–2020. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2023;(9):29–42. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-9-29-42>
16. Volkova L. V., Shchennikova I. N. Comparative evaluation of methods for calculating adaptive responses of cereals. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* = Theoretical and Applied Ecology. 2020;(3):140–146. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2020-3-140-146>

Сведения об авторах

✉ **Лыскова Ирина Владимировна**, кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник, Фалёнская селекционная станция – филиал ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», ул. Тимирязева, д. 3, п. Фалёнки, Кировская область, Российская Федерация, 612500, e-mail: fss.nauka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1079-3513>

Суховеева Ольга Эдуардовна, кандидат геогр. наук, старший научный сотрудник, ФГБНУ Институт географии Российской академии наук, Старомонетный пер., д. 29, стр. 4, г. Москва, Российская Федерация, 119017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3620-9661>

Пислегина Светлана Сергеевна, научный сотрудник лаборатории селекции и первичного семеноводства зернобобовых культур, Фалёнская селекционная станция – филиал ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого», ул. Тимирязева, д. 3, п. Фалёнки, Кировская область, Российская Федерация, 612500, e-mail: fss.nauka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0553-7707>

Information about the authors

✉ **Irina V. Lyskova**, PhD in Agricultural Science, senior researcher, Falenki Breeding Station – Branch of Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Timiryazev str., 3, s. Falenki, Kirov region, Russian Federation, 612500, e-mail: fss.nauka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1079-3513>

Olga E. Sukhoveeva, PhD in Geography, senior researcher, Institute of geography, Russian Academy of Sciences, Staromonetnyi str., 29-4, Moscow, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3620-9661>

Svetlana S. Pislegina, researcher, the Laboratory of Breeding and Primary Seed Production of Legume Crops, Falenki Breeding Station – Branch of Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, Timiryazev str., 3, s. Falenki, Kirov region, Russian Federation, 612500, e-mail: fss.nauka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0553-7707>

✉ – Для контактов / Corresponding author

Влияние предпосевной обработки семян электрофизическими и химическими воздействиями на урожайность зерна кукурузы

© 2025. В. И. Пахомов, А. В. Брагинец, О. Н. Бахчевников✉, Д. А. Максак
ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», г. Зерноград, Российская Федерация

В опубликованных результатах научных исследований по предпосевной обработке семян сельскохозяйственных культур различными способами недостаточно изучена сравнительная эффективность их применения на семенах кукурузы. Цель исследования – определить влияние предпосевной обработки семян кукурузы ультрафиолетовым (УФ) излучением, сверхвысокочастотным (СВЧ) излучением, газообразным озоном, фунгицидным препаратом Скарлет (контроль) на урожайность зерна в условиях полевого опыта. Исследования выполняли на юге Ростовской области в 2021–2023 гг. Обработку семян гибрида кукурузы Сапсан МВ УФ, СВЧ и озоном провели за сутки до посева, фунгицидом – в день посева. Установлено, что предпосевная обработка семян кукурузы изученными способами увеличивает ее урожайность по сравнению с полусухим протравливанием препаратом Скарлет (0,4 л/т). Наибольшее статистически значимое влияние на урожайность кукурузы оказала предпосевная обработка семян УФ-излучением (УФ-А 200–280 нм и УФ-С 315–380 нм, 10 мин): +41,0 % к биологической урожайности и +40,7 % к фактической по сравнению с протравливанием. Немного уступает обработке УФ по эффективности обработка озоном (60 мг/м³, 5 мин): +39,9 % к биологической урожайности и +36,3 % к фактической. Обработка семян кукурузы СВЧ (2450 МГц, 700 Вт, 1 мин) показала наименьшую эффективность: +25,6 % к биологической урожайности и +24,1 % к фактической. Рост урожайности кукурузы в результате предпосевной обработки семян был достигнут за счет увеличения количества растений на единицу площади и початков на них, а также массы зерна с початка и массы 1000 зерен. Для замены традиционного способа предпосевной обработки семян кукурузы (протравливание) наиболее подходят способы, основанные на действии УФ-излучения и озона, обеспечивающие наибольшее увеличение урожайности зерна кукурузы в сравнении с обработкой фунгицидом Скарлет.

Ключевые слова: *Zea mays* L., структура урожая, озонирование, СВЧ-излучение, УФ-излучение

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (тема № 0505-2025-0001)

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Пахомов В. И., Брагинец А. В., Бахчевников О. Н., Максак Д. А. Влияние предпосевной обработки семян электрофизическими и химическими воздействиями на урожайность зерна кукурузы. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(1):59–69. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.59-69>

Поступила: 04.06.2024

Принята к публикации: 15.01.2025

Опубликована онлайн: 26.02.2025

Effect of pre-sowing seed treatment by electrophysical and chemical exposures on maize grain yields

© 2025. Viktor I. Pakhomov, Andrey V. Braginetz, Oleg N. Bakhchevnikov✉,
Dmitriy A. Maksak

Agricultural Research Centre Donskoy, Zernograd, Russian Federation

The comparative effectiveness of pre-sowing treatment of maize (*Zea mays* L.) seeds by different methods is not sufficiently studied in the published results of scientific research. The aim of the study was to determine the effect of pre-sowing treatment of maize seeds with ultraviolet (UV) radiation, microwave (MW) radiation, gaseous ozone, fungicidal preparation Scarlet (control) on corn yield in the field experiment. The studies were carried out in the south of Rostov region in 2021–2023. Seeds of maize hybrid ‘Sapsan MV’ were treated with UV, MW and ozone on the day before sowing, and with fungicide on the day of sowing. It has been established that pre-sowing treatment of maize seeds by the studied methods increases its yield compared to semi-dry treatment with Scarlet preparation (0.4 l/t). Pre-sowing treatment of seeds with UV radiation (UVA 200–280 nm and UVC 315–380 nm, 10 min) had the greatest statistically significant effect on corn yield: +41.0 % to biological yield and +40.7 % to actual yield in comparison with treatment by fungicide. Ozone treatment (60 mg/m³, 5 min) was slightly less effective than UV treatment: +39.9 % to biological yield and +36.3 % to actual yield. Microwave treatment (2450 MHz, 700 W, 1 min) of maize seeds showed the lowest efficiency: +25.6 % to biological yield and +24.1 % to actual yield. Increase in corn yield was achieved as a result of pre-sowing seed treatment by increasing the number of plants per unit area and the number of cobs on them, as well as the mass of corn per cob and the mass of 1000 grains. Methods based on the action of UV radiation and ozone are the most suitable to replace the traditional method of pre-sowing treatment of maize seeds (fungicide treatment). These methods provide the greatest increase in corn yield compared to fungicide treatment.

Keywords: *Zea mays* L., yield structure, ozonation, microwave radiation, UV radiation

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 Agricultural Research Centre Donskoy (theme No. 0505-2025-0001).

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

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

For citation: Pakhomov V. I., Braginets A. V., Bakhchevnikov O. N., Maksak D. A. Effect of pre-sowing seed treatment by electrophysical and chemical exposures on maize grain yields. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):59–69. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.59-69>

Received: 04.06.2024

Accepted for publication: 15.01.2025

Published online: 26.02.2025

В растениеводстве предпосевной обработке семян пропашных культур для их обеззараживания и улучшения всхожести уделяют особое внимание. Установлено, что предпосевная обработка способствует синхронизации прорастания семян, улучшению роста проростков и их укоренению в почве и, в конечном итоге, повышению урожайности [1, 2].

Для сельского хозяйства юга России важное значение имеет повышение урожайности кукурузы при выращивании на зерно, причем желательно добиться этого без увеличения доз внесения дорогостоящих минеральных удобрений.

При предпосевной обработке семян культурных растений в основном применяют различные химические препараты, в том числе инсектицидные и фунгицидные [3], которые имеют значительный недостаток, так как высокотоксичны для человека и животных [4]. Кроме того, повышение урожайности после такой обработки достигается за счет уничтожения патогенной микрофлоры и снижения заболеваемости, а не стимулирования прорастания семян и развития растений. Поэтому применение способов предпосевной обработки семян растений, основанных на действии электромагнитного излучения, имеет значительные преимущества перед традиционной обработкой химическими препаратами, так как при высокой эффективности оно более безопасно для людей и окружающей среды, сочетая обеззараживание со стимулированием прорастания [5]. Для предпосевной обработки семян используют такие виды электромагнитного поля, как ультрафиолетовое (УФ) излучение, сверхвысокочастотное (СВЧ) излучение, импульсное электрическое поле, магнитное поле и другие [6, 7].

Кроме различных видов электромагнитных излучений, для предпосевной обработки семян применяют озонирование, позволяющее эффективно уничтожать патогенные микроорганизмы и стимулировать их прорастание [8, 9].

Предпосевная обработка семян культурных растений электромагнитными излучениями и озоном обеспечивает их более быстрое и равномерное прорастание после посева [10]. Выявлена положительная корреляция между всхо-

жестью семян и урожайностью растений, что повышает актуальность исследований в этой области [11]. Помимо этого установлено, что при определенных условиях кратковременное действие электромагнитных излучений и озона на семена является положительным стрессовым воздействием (эустресс), в результате которого растения приобретают устойчивость к абиотическим стрессам, сохраняющуюся в течение всего периода вегетации [12, 13].

Результаты исследований показывают, что положительное влияние озонирования на вегетацию растений основано на химическом взаимодействии озона с оболочкой семян, нарушающем их состояние покоя [8]. В работе И. В. Баскакова с соавт. [14] сообщается, что обработка озоном семян кукурузы увеличила ее урожайность на 13,4 % за счет увеличения числа початков на 6,66 % и массы 1000 зерен – на 12,75 %.

В настоящее время установлено положительное действие УФ-излучения на семена растений, приводящее к увеличению их всхожести и развития ростков вследствие разрушения излучением оболочки семян и повышения их внутренней температуры [15]. П. Садегианфар с соавт. (P. Sadeghianfar et al.) установили, что обработка семян кукурузы УФ-излучением увеличивает скорость их прорастания [16].

Опубликованы результаты научных исследований, показывающие, что действие на семена СВЧ-излучения частотой 2,45 ГГц оказывает положительное влияние на их прорастание, а также на рост проростков и накопление биомассы у разных видов растений [17]. СВЧ-излучение активирует различные физические и биохимические процессы в клетках, что нарушает состояние покоя семян и способствует их прорастанию [6].

Несмотря на то, что опубликованы результаты многих научных исследований, посвященных изучению действенности предпосевной обработки семян растений новыми способами, имеющиеся знания в этой области еще недостаточны, так как большинство из них показывают эффективность лишь одного конкретного способа обработки. Сравнительная эффективность

применения различных электрофизических и химических способов предпосевной обработки семян кукурузы еще недостаточно изучена. Необходимо провести исследования сравнительной эффективности различных электрофизических и химических способов предпосевной обработки семян кукурузы, выполнив их на одном сорте (гибриде) растений в одинаковых условиях.

Цель исследования – определить в условиях полевого опыта влияние предпосевной обработки семян кукурузы озонированием, СВЧ- и УФ-излучением, фунгицидным препаратом на ее урожайность при возделывании на зерно.

Научная новизна – сравнительная оценка влияния предпосевной обработки семян кукурузы электрофизическими способами, озоном и фунгицидом на ее урожайность в полевом опыте.

Материал и методы. Исследования проводили в условиях Ростовской области России (Зерноградский район) в 2021–2023 гг. Закладку полевого опыта, выполнение наблюдений и расчетов провели в соответствии с общепринятыми методиками^{1, 2}. Опыт – однофакторный с систематическим размещением вариантов в пределах опытного участка, повторность – четырехкратная. Площадь опытной делянки – 80 м², учетной – 20 м².

Объект исследования – простой среднеспелый (ФАО 350) гибрид кукурузы Сапсан МВ селекции ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» [18, 19].

На каждой из делянок были посеяны семена кукурузы, предварительно обработанные одним из следующих способов: газообразным озоном (озонирование); УФ-излучением; СВЧ-излучением; фунгицидным препаратом (контроль). Предшественник кукурузы в севообороте – озимая пшеница.

Почва опытного участка – чернозем обыкновенный карбонатный тяжелосуглинистый (Voronik Chernozems Pachic по классификации WRB 2014). Содержание гумуса (по методу Тюрина³) – 3,2 %, общего азота (по ГОСТ Р 58596-2019⁴) – 28,6 мг/кг, подвижного фосфора (по методу Кирсанова⁵) – 20–25 мг/кг, обменного калия (по методу Масловой⁶) – 300–350 мг/кг, pH солевой вытяжки (по ГОСТ 26483-85)⁷ – 7,0.

В период вегетации 2021 г. количество осадков и температура воздуха соответствовали среднегодовой норме, но во второй ее половине наблюдалась почвенная и воздушная засуха. В период вегетации 2022 г. выпало недостаточное количество осадков, значительно меньше среднегодовой нормы (58,6 %), температура воздуха соответствовала норме. В период вегетации 2023 г. наблюдали небольшое превышение количества осадков (на 3–4 %) и средней температуры воздуха (на 2–3 °C) над среднегодовой нормой. Согласно данным многолетних метеонаблюдений, на юге Ростовской области два года из трех являются засушливыми, поэтому в целом годы проведения полевого опыта являлись типичными для этой почвенно-климатической зоны.

Посев кукурузы выполнен селекционной сеялкой для пропашных культур «Клен-4,5» на глубину 6–8 см при достижении физической спелости почвы. Норма высева кукурузы – 60 тыс. всхожих семян/га. Перед посевом в почву внесли аммофос в дозе 50 кг/га. Агротехника выращивания кукурузы – общепринятая для южной зоны Ростовской области⁸, за исключением способа предпосевной обработки семян – рекомендуемая обработка фунгицидом была заменена обработкой озоном, УФ- и СВЧ-излучениями.

¹Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. 1. М.: ФГБУ «Госсорткомиссия», 2019. 329 с.

²Доспехов Б. А. Методика полевого опыта: (с основами статистической обработки результатов исследований). Изд. 6-е, стер. М.: Альянс, 2011. 350 с.

³ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 11 с. URL: https://rosgos.ru/file/gost/13/080/gost_26213-2021.pdf

⁴ГОСТ Р 58596-2019. Почвы. Методы определения общего азота. М.: Стандартинформ, 2019. 11 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293726/4293726644.pdf>

⁵ГОСТ Р 54650-2011. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. М.: Стандартинформ, 2013. 11 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200094361>

⁶ГОСТ 26210-91. Почвы. Определение обменного калия по методу Масловой. М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1992. 5 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023455>

⁷ГОСТ 26483-85. Почвы. Определение pH солевой вытяжки, обменной кислотности, обменных катионов, содержания нитратов, обменного аммония и подвижной серы методами ЦИНАО. М.: изд-во стандартов, 1985. 6 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/738/4294827946.pdf>

⁸Зональные системы земледелия Ростовской области на 2022–2026 годы. Клименко А. И., Гринько А. В., Грабовец А. И. [и др.]. Ростов-на-Дону: ФРАНЦ, 2022. 736 с.

Обработку семян изучаемыми способами провели за сутки до их посева, за исключением обработки фунгицидом, выполненной в день посева.

Обработку семян кукурузы газообразным озоном с концентрацией 60 мг/м³ проводили на лабораторной установке в течение 5 мин [20]. Озонирование выполняли, пропуская семена по трубе с боковыми отверстиями, в которые поступал производимый в озонаторе газообразный озон, смешанный с воздухом и нагнетаемый центробежным вентилятором. Отработанный озон выводили из лабораторной установки.

Семена кукурузы УФ-излучением обрабатывали на лабораторной установке, включавшей УФ-лампы и УФ-светодиоды со спектром излучения диапазонов УФ-А (200–280 нм) и УФ-С (315–380 нм). С помощью установки создавали освещенность 9,8 мВт/см² в течение 10 мин. Расстояние от облучателя до семян на ленточном конвейере – 0,1 м [16].

Обработку семян кукурузы СВЧ-излучением выполняли на лабораторной установке за день до посева, предварительно увлажнив до 14 %, затем в течение 1 мин обработали СВЧ-излучением частотой 2450 МГц и мощностью 700 Вт [21].

В качестве контроля использовали данные по урожайности кукурузы, семена которой обрабатывали методом полусухого протравливания с использованием фунгицидного препарата Скарлет (60 г/л тебуконазол + 100 г/л имазалил) в дозе 0,4 л/т (расход рабочей жидкости 10 л/т) [22].

В течение вегетационного периода кукурузы осуществляли фенологические наблюдения за ростом и развитием растений.

После достижения полной спелости зерна кукурузы методом отбора проб и структурного анализа определили биологическую урожайность и ее структуру согласно «Методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур»⁹. Фазу полной спелости у растений кукурузы отмечали по появлению черного слоя в точке прикрепления зерновки к стержню початка [18].

Изучили влияние способа предпосевной обработки семян на биологическую и фактическую урожайность кукурузы, выращиваемой на зерно, и количественные признаки структуры урожайности: «количество растений на 1 м²», «количество початков на 1 м²», «количество початков на 1 растение», «длина початка», «количество рядов зерен в початке», «количество

зерен в ряду», «количество зерен в початке», «масса початка», «масса зерна с початка», «масса 1000 зерен», «выход зерна с початка».

В ходе анализа экспериментальных данных определили изменение значений количественных признаков, обусловивших повышение урожайности [19].

Уборка опытных делянок выполнена зерноуборочным комбайном Wintersteiger Classic Plus. После этого определяли фактическую урожайность кукурузы с последующим пересчетом на зерно стандартной влажности.

Статистическую достоверность результатов сбора и обработки экспериментальных данных определяли методом дисперсионного анализа, вычислив НСР (наименьшую существенную разность) по критерию Стьюдента при 5%-ном уровне значимости¹⁰ и сравнив ее с разницей между средними значениями показателей изучаемого и контрольного вариантов (*d*).

Результаты и их обсуждение. Обследование посевов на опытных делянках показало, что предварительно обработанные различными электрофизическими и химическими способами семена кукурузы дали дружные всходы, в начальную фазу вегетации растения развивались нормально, обеспечив в последующем получение хорошего урожая. Состояние опытных посевов кукурузы в процессе вегетации показано на рисунке 1.

В таблице и на рисунке 2 приведены результаты определения биологической и фактической урожайности кукурузы на зерно (среднее за 2021–2023 гг.), семена которой предварительно перед посевом обработали исследуемыми электрофизическими и химическими способами.

Анализ результатов полевого опыта показал, что применение озонирования и УФ-излучения для предпосевной обработки семян привело к значимому увеличению биологической и фактической урожайности кукурузы при возделывании на зерно по сравнению с контролем (протравливание). При этом наибольшее увеличение урожайности обеспечило применение УФ-излучения +41,0 % к биологической и +40,7 % к фактической, немного уступает в эффективности обработка зерна озоном: +39,9 и +36,3 % к контролю соответственно. Обработка СВЧ-излучением показала наименьшее и статистически недоказанное влияние на урожайность: +25,6 и +24,1 % к контролю соответственно.

⁹ Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. М., 2019. 329 с.

¹⁰ Доспехов Б. А. Указ. соч.

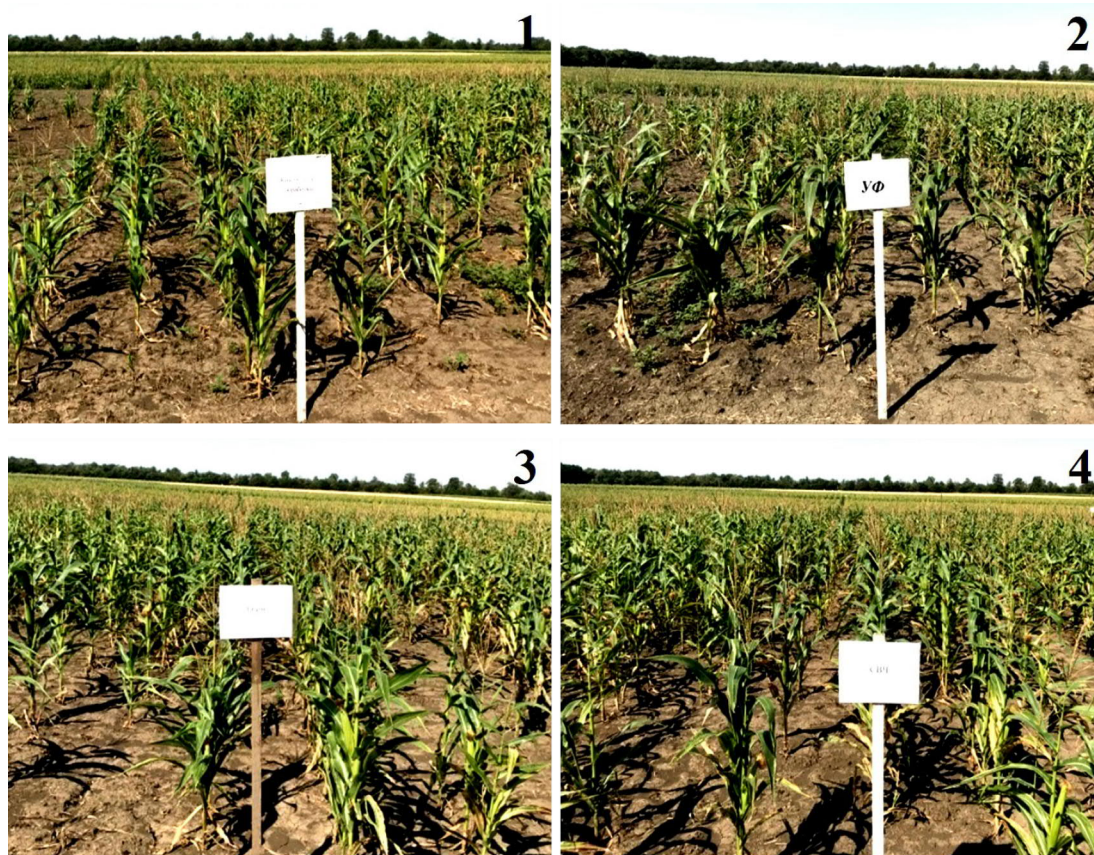


Рис. 1. Состояние посевов гибрида кукурузы Сапсан МВ в вариантах предпосевной обработки (2023 г.): 1 – контроль (протравливание); 2 – УФ-излучение; 3 – озонирование; 4 – СВЧ-излучение /
Fig. 1. Sowing condition of corn hybrid 'Sapsan MV' in variants of pre-sowing treatment (2023): 1 – control (treatment with fungicide); 2 – UV radiation; 3 – ozonation; 4 – microwave radiation

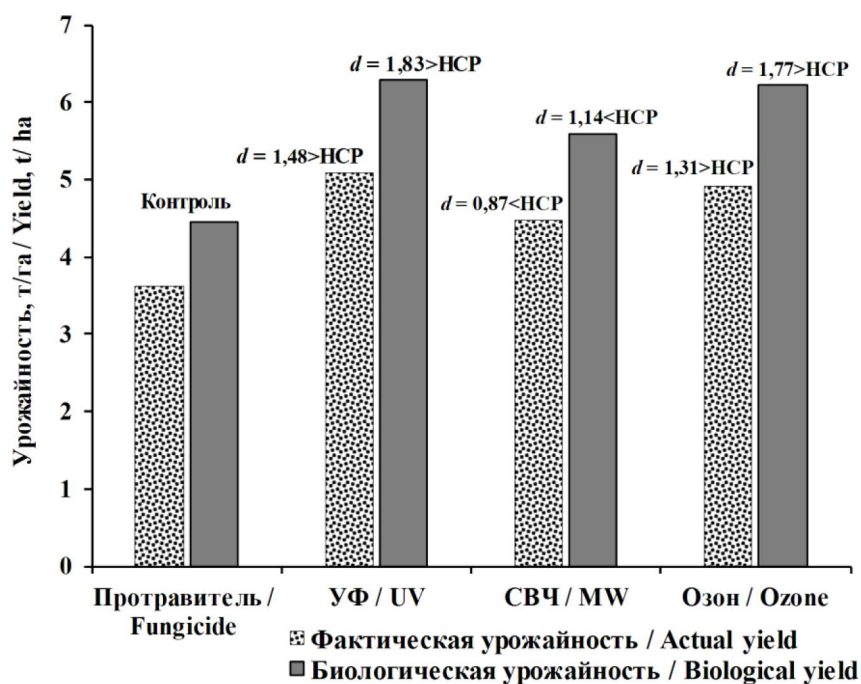


Рис. 2. Фактическая и биологическая урожайность зерна гибрида кукурузы Сапсан МВ в зависимости от предпосевной обработки семян (НСР₀₅ для биологической – 1,58 т/га, для фактической – 1,22 т/га) (среднее за 2021–2023 гг.) /

Fig. 2. Actual and biological corn yield of maize hybrid 'Sapsan MV' in variants of pre-sowing treatment (least significant difference for biological yield is 1.58 t/ha, for actual yield 1.22 t/ha) (average for 2021–2023)

Таблица – Структура урожайности гибрида кукурузы Сапсан МВ при возделывании на зерно в зависимости от способа предпосевной обработки семян (среднее за 2021–2023 гг.) /

Table – Structure of grain yield of maize hybrid ‘Sapsan MV’ depending on the method of pre-sowing treatment of its seeds (average for 2021–2023)

Показатель / Indicator	Способ предпосевной обработки семян / Method of seeds pre-sowing treatment				HCP ₀₅ / LSD ₀₅
	протравливание (контроль) / treatment by fungicide (control)	озониро- вание/ ozonation	СВЧ / MW	УФ / UV	
Количество растений на 1 м ² , шт. / Number of plants per 1 m ² , pcs.	4,86	5,14	5,06	5,41*	0,34
Количество початков на 1 м ² , шт. / Number of corncobs per 1 m ² , pcs.	4,10	5,03*	4,57	5,13*	0,81
Количество початков на 1 растение, шт. / Number of corncobs per 1 plant, pcs.	0,84	0,98*	0,90	0,95*	0,1
Длина початка, см / Corncob length, cm	17,5	18,2*	18,4*	17,8	0,63
Количество рядов зерен в початке, шт. / Number of grain rows in corncob, pcs.	12,8	12,6	12,6	13,6*	0,13
Количество зерен в ряду, шт. / Number of grains in a row, pcs.	32,5	34,8*	32,9	33,7	1,3
Количество зерен в початке, шт. / Number of grains on the corncob, pcs.	416,0	438,5	414,5	458,3*	21,1
Масса початка, г / Corncob mass, g	135,3	158,2*	157,7*	155,2	21,7
Масса зерна с початка, г / Grain mass per corncob, g	108,8	124,0*	122,6	122,7	14,3
Масса 1000 зерен, г / Mass of 1000 grains, g	267,9	302,3	335,1*	272,8	35,5
Выход зерна с початка, % / Grain yield per corncob, %	0,81	0,79	0,80	0,81	0,01
Биологическая урожайность, т/га / Biological yield, tonnes per hectare	4,46	6,23*	5,60	6,29*	1,58
Фактическая урожайность, т/га / Actual yield, tonnes per hectare	3,61	4,92*	4,48	5,08*	1,22

* Достоверное увеличение к контролю при $p \leq 0,05$ / *Significant increase to control at $p \leq 0.05$

Схожую динамику продемонстрировали и прочие показатели структуры биологической урожайности кукурузы при возделывании на зерно (табл.). Значения большинства из них увеличились по сравнению с контролем в результате обработки семян исследуемыми методами. Не показали значимых изменений по сравнению с контролем лишь значения признака «выход зерна с початка».

Анализ данных таблицы показывает, что прирост биологической урожайности кукурузы, семена которой были обработаны УФ-излучением, обеспечен увеличением значений признаков «количество растений на 1 м²», «количество початков на 1 м²» и «количество початков на 1 растение».

Из данных таблицы и рисунка 3 видно, что наибольшее влияние на значения этих пока-

зателей достоверно оказывала предпосевная обработка семян УФ-излучением: количество растений на единицу площади по сравнению с контролем увеличилось на 11,3 %, количество початков на единицу площади – на 25,1 %. Обработка семян кукурузы озоном менее эффективна для увеличения количества растений и початков на них, чем обработка УФ-излучением. В результате озонирования семян количество початков на единицу площади увеличилось на 22,7 % по сравнению с контролем.

Для показателя «количество початков на растение» наилучший достоверный результат по отношению к контролю дало озонирование семян (+16,7 %), на втором месте по эффективности УФ-излучение (+13,1 %). Для показателя «количество зерен на початке» наилучший достоверный результат получили при обработке семян УФ-излучением (+10,2 % к контролю).

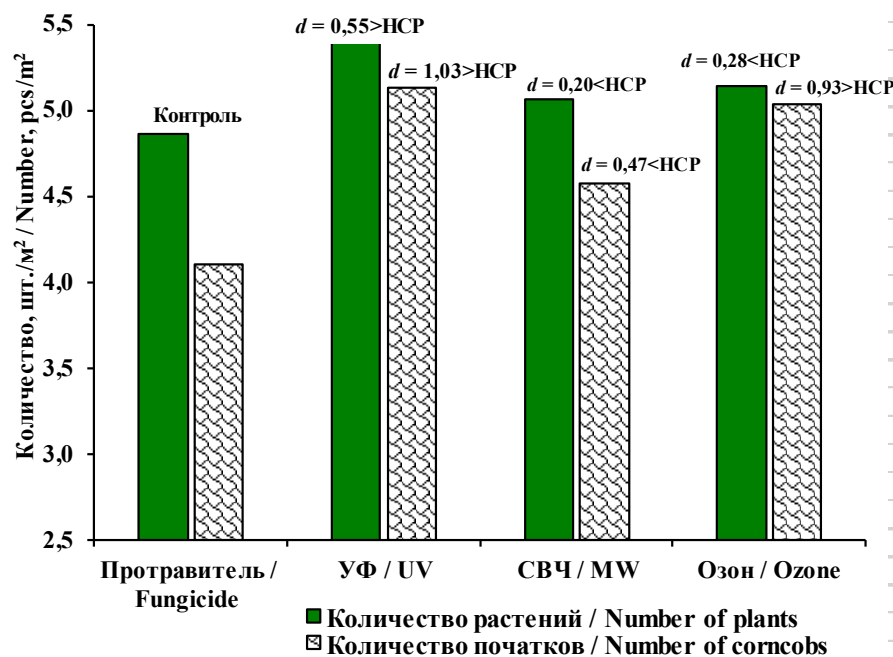


Рис. 3. Зависимость количества растений и початков гибрида кукурузы Сапсан МВ на единицу площади от способа предпосевной обработки семян (HCP₀₅ для количества растений 0,34 шт/м², для количества початков 0,81 шт/м²) (среднее за 2021–2023 гг.) /

Fig. 3. Dependence of the number of plants and corn cobs of maize hybrid 'Sapsan MV' per unit of area on the method of pre-sowing treatment of its seeds (least significant difference for the number of plants is 0.34 pcs/m², for the number of corn cobs 0.81 pcs/m²) (average for 2021–2023)

Изучение количественных признаков «масса зерна с початка» и «масса 1000 зерен»

(рис. 4) показало, что способы обработки семян влияют на их изменение различным образом.

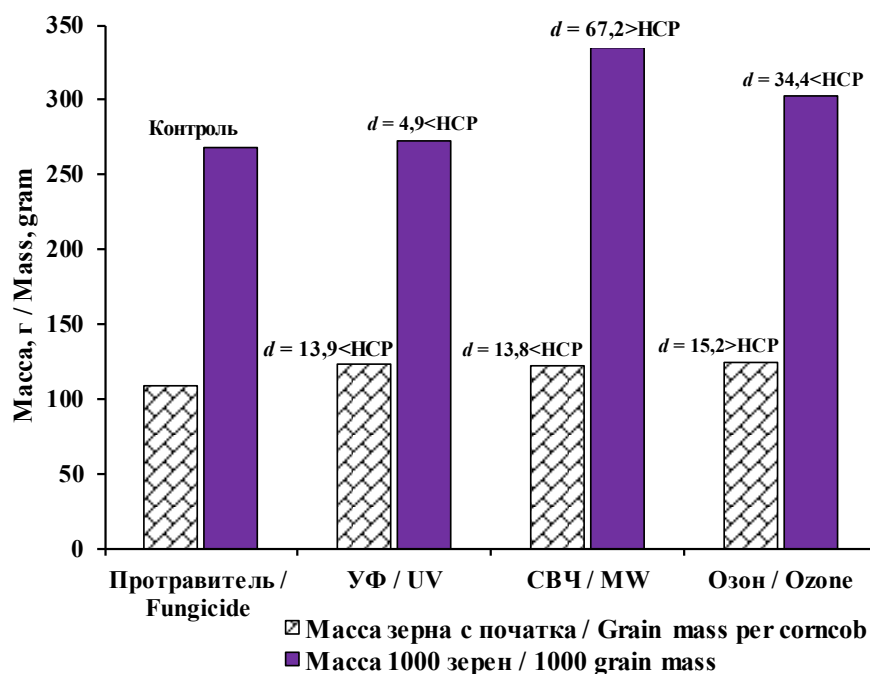


Рис. 4. Зависимость массы зерна с початка и массы 1000 зерен гибрида кукурузы Сапсан МВ от способа предпосевной обработки семян (HCP₀₅ для массы зерна с початка 14,3 г, для массы 1000 зерен 35,5 г) (среднее за 2021–2023 гг.) /

Fig. 4. Dependence of grain mass per corn cob and mass of 1000 grains of maize hybrid 'Sapsan MV' on the method of pre-sowing treatment of its seeds (least significant difference for grain mass per corn cob is 14.3 g, for the mass of 1000 grains 35.5 g) (average for 2021–2023)

Масса зерна с початка достоверно возрас- тала после предпосевной обработки семян озоном на 14,0 %, обработка СВЧ- и УФ-излу- чением этот показатель увеличивала несуще- ственно – на 12,7 и 12,8 % соответственно.

Масса 1000 зерен более всего повы- шалась в результате предпосевной обработки семян СВЧ-излучением – на 25 %, обработка УФ-излучением и озоном существенно не повлияла на увеличение массы 1000 зерен.

Кроме того, предпосевная обработка семян кукурузы оказала достоверное влияние еще на два признака структуры урожайности: «длина початка» и «масса початка». Длина початка более всего увеличилась по сравнению с контролем после обработки семян СВЧ-излу- чением и озоном – на 5,1 и 4,0 %, соответ- ственно, после обработки УФ-излучением этот показатель увеличился лишь на 1,7 %.

Увеличение средней массы початка наиболее значительно после обработки семян озоном (на 16,9 %) и СВЧ-излучением (на 16,5 %) по сравнению с контролем. Меньшее и стати- стически незначимое влияние на увеличение средней массы початка оказало УФ-излучение – на 14,7 %.

Заключение. Наибольшее достоверное положительное влияние на урожайность гибрида кукурузы Сапсан МВ на зерно оказала предпо- севная обработка семян УФ-излучением: +41,0 % к биологической урожайности и +40,7 % к фактической по сравнению с протравли- ванием фунгицидом Скарлет. Также обработка семян УФ-излучением в наибольшей степени повышала значения большинства количествен- ных признаков структуры биологической уро- жайности по сравнению с контролем.

Немного уступала обработке УФ-излу- чением по эффективности обработка семян кукурузы газообразным озоном: +39,9 % к био- логической урожайности и +36,3 % к факти- ческой. Обработка семян кукурузы СВЧ-излу- чением показала наименьшую и статистически недоказанную эффективность среди изучаемых способов предпосевной обработки семян: +25,6 % к биологической урожайности и +24,1 % к фактической.

Структурный анализ показал, что увели- чение биологической урожайности кукурузы на зерно в результате предпосевной обработки семян УФ-излучением было достигнуто за счет достоверного увеличения показателей «коли- чество растений и початков на единицу пло- щади», «количество початков на растении», «количество зерен в початке». Увеличение био- логической урожайности в результате обработки семян озоном было достигнуто за счет досто- верного увеличения количества початков на единицу площади и растении, а также массы зерна с початка.

Таким образом, для замены традицион- ного способа предпосевной обработки семян кукурузы (протравливание химическими пре- паратами) наиболее подходят способы, осно- ванные на действии УФ-излучения и озона, как обеспечивающие наибольшее увеличение урожайности на зерно.

Показанная в данном исследовании эффективность предпосевной обработки семян кукурузы озоном и УФ-излучением была достигнута при небольшом масштабе полевого опыта и обработке семян малыми партиями в лабораторных условиях. Поэтому эти способы обработки семян, несмотря на высокую эффек- тивность, пока не могут быть использованы в условиях сельхозпредприятий. Для этого необходимо выполнить дополнительные научно-исследовательские и конструкторские работы по масштабированию этих способов для реальных производственных условий.

В ходе последующих научных исследо- ваний необходимо установить рациональные параметры предпосевной обработки семян кукурузы озонированием, УФ-излучением и СВЧ-излучением, обеспечивающие наивыс- шую урожайность при приемлемых затратах. Также следует проверить воздействие изученных способов предпосевной обработки семян на урожайность кукурузы, возделываемой на силос. Перспективным направлением научных иссле- дований является изучение эффективности предпосевной обработки семян кукурузы совместным действием газообразного озона и УФ-излучения.

Список литературы

1. Carrera-Castano G., Calleja-Cabrera J., Pernas M., Gomez L., Onate-Sanchez L. An updated overview on the regulation of seed germination. *Plants*. 2020;9(6):703. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9060703>
2. Los A., Ziuzina D., Bourke P. Current and future technologies for microbiological decontamination of cereal grains. *Journal of Food Science*. 2018;83(6):1484–1493. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14181>
3. Пилипенко Н. Г., Андреева О. Т., Сидорова Л. П., Харченко Н. Ю. Влияние предпосевной обработки семян на развитие болезней и продуктивность зерновых культур. *Кормопроизводство*. 2022;(1):37–42. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48177220> EDN: XOGXVU
4. Долженко В. И., Лаптиев А. Б. Современный ассортимент средств защиты растений: биологическая эффективность и безопасность. *Плодородие*. 2021;(3):71–75. DOI: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.120.13> EDN: ZUQONQ
5. Araujo S. D. S., Paparella S., Dondi D., Bentivoglio A., Carbonera D., Balestrazzi A. Physical methods for seed invigoration: advantages and challenges in seed technology. *Frontiers in Plant Science*. 2016;7:646. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00646>
6. Rifna E. J., Ramanan K. R., Mahendran R. Emerging technology applications for improving seed germination. *Trends in Food Science & Technology*. 2019;86:95–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.029>
7. Bera K., Dutta P., Sadhukhan S. Seed priming with non-ionizing physical agents: plant responses and underlying physiological mechanisms. *Plant Cell Reports*. 2022;41(1):53–73. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00299-021-02798-y>
8. Pandiselvam R., Mayookha V. P., Kothakota A., Sharmila L., Ramesh S. V., Bharathi C. P., Gomathy K., Srikanth V. Impact of ozone treatment on seed germination – a systematic review. *Ozone: Science & Engineering*. 2020;42(4):331–346. DOI: <https://doi.org/10.1080/01919512.2019.1673697>
9. Akdemir Evrendilek G. Ozone processing of corn grains: Effect on seed vigor and surface disinfection. *Ozone: Science & Engineering*. 2024;46(2):163–173. DOI: <https://doi.org/10.1080/01919512.2023.2213252>
10. Reed R. C., Bradford K. J., Khanday I. Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate. *Heredity*. 2022;128(6):450–459. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41437-022-00497-2>
11. Mondal S., Bose B. Impact of micronutrient seed priming on germination, growth, development, nutritional status and yield aspects of plants. *Journal of Plant Nutrition*. 2019;42(19):2577–2599. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1655032>
12. Romero-Galindo R., Hernández-Aguilar C., Dominguez-Pacheco A., Godina-Nava J. J., Tsonchev R. I. Biophysical methods used to generate tolerance to drought stress in seeds and plants: a review. *International Agrophysics*. 2022;35(4):389–410. DOI: <https://doi.org/10.31545/intagr/144951>
13. Villagómez-Aranda A. L., Feregrino-Pérez A. A., García-Ortega L. F., González-Chavira M. M., Torres-Pacheco I., Guevara-González R. G. Activating stress memory: Eustressors as potential tools for plant breeding. *Plant Cell Reports*. 2022;41(7):1481–1498. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00299-022-02858-x>
14. Баскаков И. В., Оробинский В. И., Василенко В. В., Гиевский А. М., Чернышов А. В. Влияние озонной обработки при хранении семян кукурузы на урожайность культуры и качество зерна. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2020;13(2):12–21. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2020.2.12> EDN: FJXGUA
15. Upadhyay A. K., Chormule S. R., Kuiry B. M., Ram B. S., Pani S. Sh., Punia Ya. Effect of UV radiation on seeds physiological parameter: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2020;9(6):1877–1879. URL: <https://www.phytojournal.com/archives?year=2020&vol=9&issue=6&ArticleId=13224>
16. Sadeghianfar P., Nazari M., Backes G. Exposure to ultraviolet (UV-C) radiation increases germination rate of maize (*Zea mays* L.) and sugar beet (*Beta vulgaris*) seeds. *Plants*. 2019;8(2):49. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants8020049>
17. Haque N., Agrawal A., Pati A. K. A mini review on effects of microwave on seed germination. *Research Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2023;15(1):82–86. DOI: <https://doi.org/10.52711/0975-4385.2023.00012>
18. Кривошеев Г. Я., Игнатьев А. С., Лупиного Д. Р., Арженовская Ю. Б. Сравнительное изучение простых межлинейных и трехлинейных гибридов кукурузы. *Зерновое хозяйство России*. 2022;14(4):70–77. DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2022-82-4-70-77> EDN: CRPFJC
19. Кривошеев Г. Я., Игнатьев А. С. Взаимосвязь между количественными признаками, определяющими урожайность зерна гибридов кукурузы. *Зерновое хозяйство России*. 2021;(6):27–32. DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2021-78-6-27-32> EDN: NFLLQK
20. Баскаков И. В., Оробинский В. И., Василенко В. В., Гиевский А. М., Чернышов А. В. Рациональные режимы предпосевной озонной обработки семян зерновых культур. *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2020;13(4):105–114. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2020.4.105> EDN: KRPSME

21. Пахомов А. И. Сравнительный анализ СВЧ-установок для обеззараживания зерна. Тракторы и сельхозмашины. 2018;(1):21–26. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66373> EDN: YPLOTG

22. Куркина Г. Н. Действие фунгицидных протравителей на всхожесть семян и урожайность кукурузы в зависимости от сроков сева и погодных условий. Земледелие и растениеводство. 2020;(1):36–42. URL: <https://crop.belal.by/jour/article/view/26>

References

1. Carrera-Castano G., Calleja-Cabrera J., Pernas M., Gomez L., Onate-Sanchez L. An updated overview on the regulation of seed germination. *Plants*. 2020;9(6):703. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9060703>
2. Los A., Ziuizina D., Bourke P. Current and future technologies for microbiological decontamination of cereal grains. *Journal of Food Science*. 2018;83(6):1484–1493. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14181>
3. Pilipenko N. G., Andreeva O. T., Sidorova L. P., Kharchenko N. Yu. The effect of seed treatment on disease-resistance and productivity of grain crops. *Kormoproizvodstvo = Forage Production*. 2022;(1):37–42. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48177220>
4. Dolzhenko V. I., Laptiev A. B. Modern range of plant protection means: biological efficiency and safety. *Plodorodie*. 2021;(3):71–75. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.120.13>
5. Araujo S. D. S., Paparella S., Dondi D., Bentivoglio A., Carbonera D., Balestrazzi A. Physical methods for seed invigoration: advantages and challenges in seed technology. *Frontiers in Plant Science*. 2016;7:646. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00646>
6. Rifna E. J., Ramanan K. R., Mahendran R. Emerging technology applications for improving seed germination. *Trends in Food Science & Technology*. 2019;86:95–108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.029>
7. Bera K., Dutta P., Sadhukhan S. Seed priming with non-ionizing physical agents: plant responses and underlying physiological mechanisms. *Plant Cell Reports*. 2022;41(1):53–73. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00299-021-02798-y>
8. Pandiselvam R., Mayookha V. P., Kothakota A., Sharmila L., Ramesh S. V., Bharathi C. P., Gomathy K., Srikanth V. Impact of ozone treatment on seed germination – a systematic review. *Ozone: Science & Engineering*. 2020;42(4):331–346. DOI: <https://doi.org/10.1080/01919512.2019.1673697>
9. Akdemir Evrendilek G. Ozone processing of corn grains: Effect on seed vigor and surface disinfection. *Ozone: Science & Engineering*. 2024;46(2):163–173. DOI: <https://doi.org/10.1080/01919512.2023.2213252>
10. Reed R. C., Bradford K. J., Khanday I. Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate. *Heredity*. 2022;128(6):450–459. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41437-022-00497-2>
11. Mondal S., Bose B. Impact of micronutrient seed priming on germination, growth, development, nutritional status and yield aspects of plants. *Journal of Plant Nutrition*. 2019;42(19):2577–2599. DOI: <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1655032>
12. Romero-Galindo R., Hernández-Aguilar C., Dominguez-Pacheco A., Godina-Nava J. J., Tsonchev R. I. Biophysical methods used to generate tolerance to drought stress in seeds and plants: a review. *International Agrophysics*. 2022;35(4):389–410. DOI: <https://doi.org/10.31545/intagr/144951>
13. Villagómez-Aranda A. L., Feregrino-Pérez A. A., García-Ortega L. F., González-Chavira M. M., Torres-Pacheco I., Guevara-González R. G. Activating stress memory: Eustressors as potential tools for plant breeding. *Plant Cell Reports*. 2022;41(7):1481–1498. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00299-022-02858-x>
14. Baskakov I. V., Orobinskiy V. I., Vasilenko V. V., Gievskiy A. M., Chernyshov A. V. Effect of ozonation during storage of corn seeds on the yield and quality of corn grain. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh state agrarian university*. 2020;13(2):12–21. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2020.2.12>
15. Upadhyay A. K., Chormule S. R., Kuiry B. M., Ram B. S., Pani S. Sh., Punia Ya. Effect of UV radiation on seeds physiological parameter: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2020;9(6):1877–1879. URL: <https://www.phytojournal.com/archives?year=2020&vol=9&issue=6&ArticleId=13224>
16. Sadeghianfar P., Nazari M., Backes G. Exposure to ultraviolet (UV-C) radiation increases germination rate of maize (*Zea mays* L.) and sugar beet (*Beta vulgaris*) seeds. *Plants*. 2019;8(2):49. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants8020049>
17. Haque N., Agrawal A., Pati A. K. A mini review on effects of microwave on seed germination. *Research Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2023;15(1):82–86. DOI: <https://doi.org/10.52711/0975-4385.2023.00012>
18. Krivosheev G. Ya., Ignatiev A. S., Lupinoga D. R., Arzhenovskaya Yu. B. Comparative study of simple interline and three-way cross maize hybrids. *Zernovoe khozyaystvo Rossii = Grain Economy of Russia*. 2022;14(4):70–77. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2022-82-4-70-77>
19. Krivosheev G. Ya., Ignatiev A. S. Correlation between quantitative traits that affect grain yield of maize hybrids. *Zernovoe khozyaystvo Rossii = Grain Economy of Russia*. 2021;(6):27–32. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2021-78-6-27-32>

20. Baskakov I. V., Orobinskiy V. I., Vasilenko V. V., Gievskiy A. M., Chernyshov A. V. Rational operation modes for ozone presowing treatment of grain crop seeds. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of Voronezh state agrarian university. 2020;13(4):105–114. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2020.4.105>

21. Pakhomov A. I. Comparative analysis of microwave frequency devices for grain disinfection. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2018;(1):21–26. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-66373>

22. Kurkina G. N. Effect of fungicide dressing agents on seed germination and maize yield, depending on sowing dates and weather conditions. *Zemledelie i rastenievodstvo* = Crop Farming and Plant Growing. 2020;(1):36–42. (In Russ.) URL: <https://crop.belal.by/jour/article/view/26>

Сведения об авторах

Виктор Иванович Пахомов, доктор техн. наук, член-корреспондент РАН, директор, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», ул. Научный городок, д. 3, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: vniizk30@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>

Андрей Валерьевич Брагинец, кандидат техн. наук, научный сотрудник, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», ул. Научный городок, д. 3, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: vniizk30@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7188-4179>

✉ **Олег Николаевич Бахчевников**, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», ул. Научный городок, д. 3, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: vniizk30@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>, e-mail: oleg-b@list.ru

Дмитрий Андреевич Максак, инженер, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», ул. Научный городок, д. 3, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: vniizk30@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0056-8857>

Information about the authors

Viktor I. Pakhomov, DSc in Engineering, corresponding member of RAS, director, Agricultural Research Centre Donskoy, 3 Nauchnyj Gorodok St., Zernograd, Rostov Region, Russian Federation, 347740, e-mail: vniizk30@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8715-0655>

Andrey V. Braginets, PhD in Engineering, researcher, Agricultural Research Centre Donskoy, 3 Nauchnyj Gorodok St., Zernograd, Rostov Region, Russian Federation, 347740, e-mail: vniizk30@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7188-4179>

✉ **Oleg N. Bakhchevnikov**, PhD in Engineering, senior researcher, Agricultural Research Centre Donskoy, 3 Nauchnyj Gorodok St., Zernograd, Rostov Region, Russian Federation, 347740, e-mail: vniizk30@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>, e-mail: oleg-b@list.ru

Dmitriy A. Maksak, engineer, Agricultural Research Centre Donskoy, 3 Nauchnyj Gorodok St., Zernograd, Rostov Region, Russian Federation, 347740, e-mail: vniizk30@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0056-8857>

✉ – Для контактов / Corresponding author

Оценка влияния абиотических факторов внешней среды на формирование элементов структуры початка сортообразцов сахарной кукурузы в условиях Саратовской области

© 2025. С. А. Гусева✉, О. С. Носко, О. С. Башинская, Д. Д. Бабушкин
ФГБНУ «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы», г. Саратов, Российская Федерация

Для успешного возделывания и производства сахарной кукурузы (*Zea mays* var. *saccharata*) в зоне рискованного земледелия необходимо детальное изучение адаптивной способности новых сортов и гибридов. Цель исследований – оценка 47 сортообразцов сахарной кукурузы по реакции количественных признаков початка на воздействие абиотических факторов среды в условиях Правобережья Саратовской области (зона засушливых степей, климат континентальный умеренных широт, почвы – чернозём южный). Исследования проводили в 2021–2023 гг. Периоды вегетации со II декады мая по I декаду сентября характеризовались близкими значениями гидротермического коэффициента (ГТК): 2021 г. – 0,62, 2022 г. – 0,75, 2023 г. – 0,69, но значительно различались распределением осадков и температуры воздуха по месяцам. В результате исследований определена доля влияния факторов «генотип», «год», их взаимодействия, а также неучтенного фактора на изменчивость изучаемых признаков сортообразцов сахарной кукурузы. Установлено, что вариабельность диаметра початка, числа зерен в ряду в наибольшей степени зависела от фактора «год» (46,48 и 37,57 % соответственно); длины початка, количества рядов и числа зёрен в початке – от фактора «генотип» (55,70; 54,53 и 36,49 % соответственно), длина озерненной части початка – от взаимодействия факторов (32,87 %). При этом были выделены образцы, у которых по признаку «количество зерен в початке» стабильные высокие средние показатели отмечали все три года опыта – Цукерка, к-4455, к-4471, к-4840, к-1976, к-5811. Большинство изучаемых генотипов по показателю экологической пластичности H_i (С. П. Мартынов, 1989) обладали средней степенью устойчивости к воздействию окружающей среды, среди них наиболее стабильные – Услада, к-4475, Забава, к-4468, к-4456, к-5768, к-5467, к-103. В дальнейшем они будут использованы в топкроссных скрещиваниях для оценки комбинационной способности.

Ключевые слова: коллекционный питомник, двухфакторный анализ, фактор генотипа, фактор окружающей среды, взаимодействие факторов, стабильность, длина початка, диаметр початка, количество зерен с одного початка

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы» (тема №082-00219-21-00, 123011200033-0, 123020800158-6 за 2021–2023 гг.).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Гусева С. А., Носко О. С., Башинская О. С., Бабушкин Д. Д. Оценка влияния абиотических факторов внешней среды на формирование элементов структуры початка сортообразцов сахарной кукурузы в условиях Саратовской области. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(1):70–81.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.70-81>

Поступила: 21.11.2024

Принята к публикации: 06.02.2025

Опубликована онлайн: 26.02.2025

Evaluation of the influence of abiotic environmental factors on the cob structure elements formation of sweet corn cultivar samples in the Saratov Region

© 2025. Svetlana A. Guseva✉, Oksana S. Nosko, Oksana S. Bashinskaya, Denis D. Babushkin

Russian Research, Design and Technology Institute of Sorghum and Corn, Saratov, Russian Federation

For successful cultivation and production of sweet corn (*Zea mays* var. *saccharata*) in the risk farming zone, a detailed study of the adaptive capacity of new cultivars and hybrids is necessary. The objective of the research was to evaluate 47 cultivar samples of sweet corn based on the response of quantitative traits of the cob to the impact of abiotic environmental factors in the conditions of the Right Bank of the Saratov Region (arid steppe zone, continental climate of temperate latitudes, soils – southern black earth). The studies were carried out in 2021–2023. The vegetation periods from the second ten days of May to the second ten days of September were characterized by close values of the hydrothermal coefficient (HTC): 2021 – 0.62, 2022 – 0.75, 2023 – 0.69, but differed significantly in the distribution of precipitation and air temperature by months. As a result of the research, the share of influence of the factors “genotype”, “year”, their interaction, as well as an unaccounted factor on the variability of the studied characteristics of sweet corn cultivar samples was revealed. It has been established that the variability of the cob diameter and the number of grains in a row were influenced by the “year” factor to the greatest extent (46.48 u 37.57 %, respectively); the variability of cob length, rows number and the number of grains per a cob – by “genotype” factor (55.70; 54.53 u 36.49 %, respectively); grained part of a cob – by the factors interaction (32.87 %). There have also been identified the samples having steadily high average values by the “number of grains per a cob” indicator over all three years

of the experiment: 'Tsukerka', k-4455, k-4471, k-4840, k-1976, k-5811. The greatest number of genotypes had an average resistance degree to environmental influence by the "ecological plasticity" indicator H_i (S. P. Martynov, 1989). Among them the most stable were 'Uslada', k-4475, 'Zabava', k-4468, k-4456, k-5768, k-5467, k-103. In future, they should be used in topcrossing for evaluation of combining ability.

Keywords: collection nursery, two-factor analysis, genotype factor, environmental factor, factor interaction, stability, cob length, cob diameter, grain yield per cob

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 Russian Research, Design and Technology Institute of Sorghum and Corn (theme No. 082-00219-21-00, 123011200033-0, 123020800158-6 2021–2023).

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

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

For citations: Guseva S. A., Nosko O. S., Bashinskaya O. S., Babushkin D. D. Evaluation of the influence of abiotic environmental factors on the cob structure elements formation of sweet corn cultivars in the Saratov Region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):70–81. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.70-81>

Received: 21.11.2024

Accepted for publication: 06.02.2025

Published online: 26.02.2025

Одним из важных компонентов мировой агроиндустрии является кукуруза. Эта культура востребована для пищевых, кормовых и технических целей. Из ее сырья производят корма для животных, крахмал, муку, крупу, масло, алкогольные напитки, хлопья и т. д. Овощную разновидность кукурузы используют для изготовления консервов, употребления в сыром виде и в виде гарнира¹, лопающуюся – для приготовления всеми любимого попкорна. Кроме того, кукуруза используется для создания биодизеля, в медицине, косметологии. Из ее листьев и оберток початка изготавливают текстиль, бумагу и т. д. Существуют сорта кукурузы с высоким содержанием антоциана для производства натурального красителя². Зёрна кукурузы используют также в пивоварении. Кроме того, селекция, выращивание и переработка кукурузы обеспечивает работой миллионы людей пяти континентов [1, 2].

На государственном уровне в рамках «Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства» в соответствии с подпрограммой «Развитие селекции и семеноводства кукурузы» проводится работа по созданию конкурентоспособной отечественной селекционной базы³. Одной из задач подпрограммы является создание максимально адаптивных и экологически пластичных, а также высокоурожайных гибридов кукурузы для выращивания в разных эколого-географических зонах РФ. Тем более что многие научные и

производственные опыты доказывают идентичность урожайности российских и зарубежных гибридов, а при низком агрофоне и крайне неблагоприятных погодных явлениях – преимущество отечественной селекции⁴.

На продуктивность любой культуры воздействует множество факторов: генетический потенциал, особенности почвенного покрова, погодные условия, уровень агротехники и т. д. Высокая урожайность зависит от интенсивности метаболических процессов, а стрессоустойчивость растений отрицательно сопряжена с ними, и очень сложно добиться в одном генотипе совмещения этих противоположностей – чем больше энергии растение расходует на синтез биомассы, тем ее меньше остается для борьбы со стрессами [3, 4, 5]. По мнению А. А. Жученко [6], среда произрастания вносит значимую роль в изменчивость количественных признаков любой культуры, а её неправильный выбор служит причиной снижения или даже потери урожая.

Овощной подвид кукурузы более чувствителен к неблагоприятным условиям окружающей среды, чем зерновой. Сахарная кукуруза больше, чем другие подвиды требовательна к влаге из-за слабой корневой системы, а также к свету – его недостаток может поспособствовать появлению некондиционных початков, череззернице, а также полному отсутствию заложения женских соцветий [7, 8].

¹Елисеева Т., Ямпольский А. Кукуруза (лат. *Zéa máys*). Журнал здорового питания и диетологии. 2019;9(3):2–13. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kukuruza-lat-z-a-m-ys>

²Сигурдсон Г., Коллинз Т. М., Джусти М. М., Роббинс Р. Дж. (US). Композиции красителей и способы их использования: пат. №. 2721836 Российская Федерация. № 2018103214: заяв. 30.06.2015; опубл. 22.05.2020. Бюл. №15. 90 с. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/cf/e7/08/48d7706372cf99/RU2721836C2.pdf>

³Проект Постановления Правительства Российской Федерации «О внесении изменений в Федеральную научно-техническую программу развития сельского хозяйства на 2017–2025 гг.» (подготовлен Минсельхозом России 20.04.2021) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/56774902/#review> (дата обращения: 04.09.2024)

⁴Литвинова С. 9 трендов – 2023. Анализируем главное в АПК за истекший год. BETAREN – agro. 2023;11(53). [Электронный ресурс] URL: <https://betaren.ru/journal/vypusk-dekabr-2023-11-53/> (дата обращения: 04.09.2024).

Элементы структуры початка являются признаками, детерминирующими урожайность зерна. Считается, что длина початка положительно и значимо коррелирует с числом зёрен в ряду, массой зерна с початка и урожайностью⁵ [9]. Согласно ГОСТ 32882–2014⁶, для консервного производства сахарной кукурузы початок должен быть крупным, с ровным неизогнутым стержнем цилиндрической формы или слегка конусовидной, длиной не менее 18 см. Для замораживания наиболее пригодны ровные, некрупные початки, с тонким стержнем и большим выходом высококачественного зерна.

Количество зерновок в початке считается одним из признаков, в наибольшей степени подверженных воздействию внешних условий – высокая или низкая температуры, недостаточная или избыточная влагообеспеченность до и в период цветения могут способствовать увеличению разрыва между цветением мужского и женского соцветий, гибели пыльцы, подсыханию нитей початка и т. д. [10, 11].

По данным краснодарских учёных, стрессовые ситуации часто приводят к отклонениям от нормального развития початка: фасциация (низкие температуры), задержка развития (несвоевременное применение химических средств защиты, очень высокие температуры в период формирования початка), череззёрница (высокие или низкие температуры, обилие пасмурных дней, нехватка фосфора и т. д.), искривление початка за счет выпадения нескольких зёрен в ряду (суровая погода, повреждение насекомыми, неверный расчёт концентрации пестицидов), образование короткого початка и т. д. [11]. Проблема распространена достаточно широко. К примеру, в США в 2016 году был озвучен вопрос о пригодности некоторых гибридов кукурузы для определённых условий и их стабильности с течением времени [12].

По мнению Е. Ф. Сотченко и Е. А. Конаревой, при селекции сахарной кукурузы необходима предварительная оценка исходного материала по ряду признаков, их взаимодействия и устойчивости к меняющимся условиям окружающей среды, несмотря на увеличение времени для проведения эксперимента [9].

Проблеме формирования початка у сахарной кукурузы и элементов его структуры, как значимых критериев отбора, также посвящены

работы азиатских учёных. По мнению исследователей, проводивших эксперименты в разных регионах Турции, количество рядов на початке и диаметр початка зависят, в основном, от генетической структуры, агротехнологических приёмов, а погодные условия практически не оказывают на эти признаки влияния [13, 14]. Ученые Индонезии выявили существенную сопряженность между количеством зёрен в початке и в ряду, количеством рядов и урожайностью свежих початков, а также взаимосвязь развития этих признаков с условиями окружающей среды и её взаимодействием с генотипом [15].

В Российской Федерации потребность в кукурузе как пищевой, кормовой и технической культуре постоянно растёт, предполагается, что к 2030 г. только в нашей стране потребуется не менее 2 млн тонн зерна кукурузы разных подвидов [7, 10].

Саратовская область относится к зоне рискованного земледелия. Погодные условия нередко в течение всего вегетационного периода характеризуются высокой температурой воздуха, недостаточным количеством осадков и неравномерным их распределением. Проблема создания новых сортов и гибридов сахарной кукурузы, а также получения нового исходного материала, более обширного в генетическом плане остается актуальной [16, 17].

Большинство из районированных отечественных селекционных форм сахарной кукурузы возделывается, в основном, в южных регионах Европейской части РФ [18]. Для производства сахарной кукурузы в более суровых условиях Нижнего Поволжья необходимо более детальное изучение её адаптивной способности.

Цель исследований – изучить сортообразцы сахарной кукурузы (*Zea mays* var. *saccharata*) по реакции количественных признаков початка на воздействие абиотических факторов среды для дальнейшей селекции высокоурожайной сахарной кукурузы, адаптированной к агроклиматическим условиям Саратовской области.

Научная новизна – впервые в засушливых условиях Саратовской области проведена оценка различных генотипов сахарной кукурузы по элементам структуры початков и выявлены перспективные экологически стабильные образцы по признаку «число зёрен в початке».

⁵Нижимбере Ж. Селекция среднеспелых и позднеспелых сортолинейных белозерных и желтозерных гибридов кукурузы. Дисс. ... канд. с.-х. наук. Краснодар, 2024. 117 с.

⁶ГОСТ 32882–2014. Кукуруза свежая в початках для промышленной переработки Технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 8 с. URL: <http://gost.gtsilver.ru/Data/584/58409.pdf>

Материал и методы. В качестве изучаемого объекта использовали 47 генотипов сахарной кукурузы, из которых шесть зарегистрированы в Государственном реестре селекционных достижений РФ: сорта Алина и Ранняя лакомка 121 (ООО Инновационно-производственная агрофирма «Отбор»); гибрид Лакомка (ФГБНУ «Всероссийский НИИ кукурузы»); гибрид Краснодарский сахарный 250 СВ (ФГБНУ «Национальный центр зерна им. П. П. Лукьяненко»); гибрид Услава (ФГБНУ «Всероссийский НИИ кукурузы», ФГБНУ «Национальный центр зерна им. П. П. Лукьяненко», ООО СП ССК «Кукуруза»); сорт Цукерка и синтетическая популяция Забава (ФГБНУ РосНИИСК «Россорго»); остальные – коллекционные сортообразцы предоставлены ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова» (ВИГРР).

Селекционные опыты были заложены на полях ФГБНУ РосНИИСК «Россорго» в 2021–2023 гг. в условиях Правобережья Саратовской области (зона засушливых степей, располагается на территории холмистой Приволжской возвышенности, климат континентальный умеренных широт, почвы – чернозём южный). По гранулометрическому составу южный чернозем опытного участка тяжелосуглинистый крупно-пылевато-иловатый, с высокой влагоемкостью и водоудерживающей способностью. В пахотном слое содержание гумуса варьирует от 3,0 до 3,5 %. Почвы отличаются низким содержанием фосфора и высоким – калия. Агротехника – зональная для выращивания зерновых культур в засушливых регионах^{7, 8}. Способ посева – широкорядный (70х25). Норма высева – 5,5 тыс. всхожих семян на 1 га (5,5 растений на м², густоту стояния корректировали вручную). Опыт был заложен в трехкратной повторности, размещение делянок – рендомизированное. Площадь учетной делянки – 7,7 м². Предшественником служил черный пар. Проводили учёты следующих признаков: длина початка; длина озернённой

части початка; диаметр початка; число рядов на початке; число зёрен в ряду и число зёрен в початке, используя общепринятые методики^{9, 10}.

Периоды вегетации со II декады мая по I декаду сентября 2021–2023 гг. характеризовались следующими показателями ГТК: 2021 г. – 0,62, 2022 г. – 0,75, 2023 г. – 0,69. Несмотря на схожесть показателей ГТК, распределение осадков и температуры воздуха по годам значительно различались (табл. 1).

Полученные данные статистически обработаны с использованием двухфакторного дисперсионного статистического анализа. Определение доли влияния факторов «генотип» (сорт) (А), «год» (В) и их взаимодействия (АВ), а также неучтенного фактора (остаточное) помогло установить преобладающие причины изменчивости значений признаков сортообразцов сахарной кукурузы. Существенность воздействия факторов оценивали по показателям средних квадратов и *F*-критерию. Отклонение нулевой гипотезы являлось основанием для выявления их вклада в вариабельность того или иного признака. Стабильность признака «количество зерен в початке» оценивали по коэффициенту вариации (*CV*) и оценке стабильности (*H_i*), по С. П. Мартынову¹¹.

Результаты и их обсуждение. Изменчивость линейного размера початка сортообразцов сахарной кукурузы в условиях 2021–2023 гг. на 55,70 % определялась влиянием генетического фактора, на 19,71 % – фактором «год», 15,6 % – взаимодействием факторов («генотип» х «условия года») и на 8,99 % – неучтенным фактором (рис. 1). На вариабельность длины озернённой части соцветия генотип и его взаимодействия с условиями внешней среды оказывали практически равнозначное влияние (30,17 и 32,87 % соответственно), фактор «год» – 22,97 %, неучтенный фактор – 13,99 %. Диаметр початка в наибольшей степени был подвержен влиянию окружающей среды – 46,48 %, в меньшей – сорта – 17,52 % и взаимодействия этих факторов – 21,94 %. Доля влияния неучтенного фактора составила 14,06 %.

⁷Рекомендации по проведению весенних полевых работ с учетом складывающихся и ожидаемых погодных условий в 2022 сельскохозяйственном году. Саратов: ФГБНУ «ФАНЦ Юго-Востока», 2022. 20 с.

⁸Научно обоснованные системы земледелия Саратовской области. Под ред. А. Г. Ишина, Н. П. Гришина, С. А. Денисова. Саратов: Приволжское книжное изд-во, 1998. 184 с.

⁹Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Книга по требованию, 2012. 412 с.

¹⁰Методика Государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Госкомиссия по сортоиспытанию с.-х. культур при МСХ СССР. Под общ. ред. М. А. Федина. М.: 1983, Вып. 3. 352 с.

¹¹Мартынов С. П. Оценка экологической пластичности сортов сельскохозяйственных культур. Сельскохозяйственная биология. 1989;24(3):124–128.

Таблица 1 – Метеорологические условия периода вегетации сортообразцов сахарной кукурузы (2021–2023 гг.) /
Table 1 – Meteorological conditions of vegetation period of sweet corn cultivar samples (2021–2023)

Месяц / Month	Декада / Ten-day period	Осадки, мм / Precipitation, mm			Температура воздуха, °C / Air temperature, °C		
		2021 г.	2022 г.	2023 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Май / May	II	17,8	18,3	27,7	20,4	11,7	15,2
	III	2,0	11,7	9,7	20,8	13,0	20,4
Июнь / June	I	59,6	30,6	10,5	17,7	19,8	15,7
	II	13,4	1,0	1,0	21,0	21,5	18,4
	III	2,0	3,1	12,8	27,3	21,7	17,8
Июль / July	I	12,4	32,5	42,5	23,7	20,0	24,2
	II	8,5	17,1	16,8	26,5	23,0	18,3
	III	24,2	23,9	11,6	23,1	22,0	22,5
Август / August	I	-	-	3,0	25,8	24,4	25,3
	II	1,4	12,6	3,7	26,6	23,0	25,2
	III	1,1	-	18,9	21,2	24,7	17,5
Сентябрь / September	I	33,0	26,2	6,0	15,3	13,0	16,8

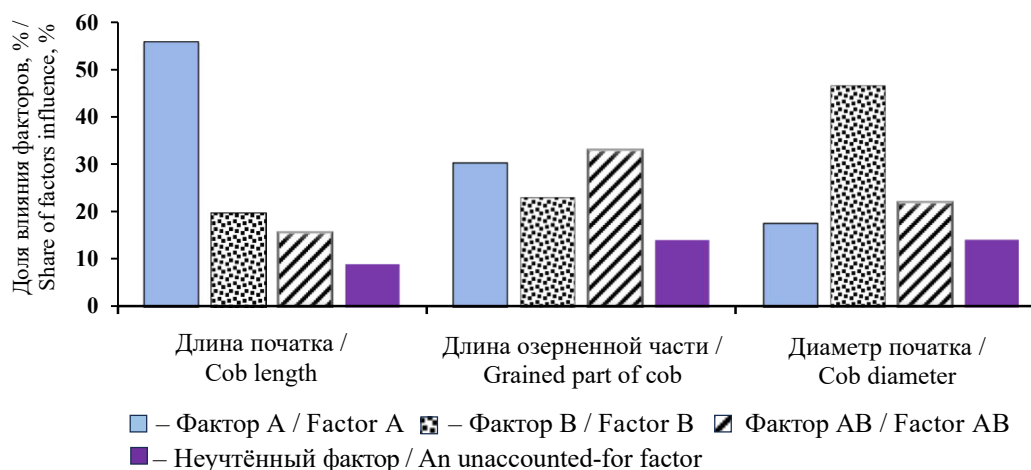


Рис. 1. Доля влияния факторов «генотип» (А), «год» (В), их взаимодействия (АВ) и неучтённого фактора (остаточного) на изменчивость длины початка, длины его озернённой части и диаметра, % /
Fig. 1. The share of influence of the factors “genotype” (A), “year” (B), their interaction (AB) and unknown factor (residual) on the variability of cob length, the length of the grained part of the cob and the cob diameter, %

Фенотипическое проявление признака «количество рядов на початке» в наибольшей степени определялось сортовыми особенностями (54,53 %), в меньшей – погодными условиями (15,3 %), совместным влиянием обоих факторов (21,30 %) и остаточным (8,7 %) (рис. 2). Вклад в вариативность признака «число зерен в ряду» составил: сорт – 30,45 %, год – 37,57 %, взаимодействие – 22,23 %, остаточное – 8,87 %.

По мнению ряда учёных, число зерновок в початке – количественный признак, сильно подверженный воздействию биотических и абиотических факторов^{12, 13}. Тем не менее, условия трёх лет опыта позволили установить, что в общую изменчивость данного признака наибольший вклад внес фактор «генотип» (36,49 %), чуть меньше – окружающая среда (30,44 %), а их взаимодействие – 23,84 %.

¹²Шмараев Г. Е. Генофонд и селекция кукурузы. СПб.: ВИР, 1999. 390 с.

¹³Hatfield J. L., Dold C. Climate Change Impacts on Corn Phenology and Productivity [Internet]. Corn - Production and Human Health in Changing Climate. InTech, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.76933>

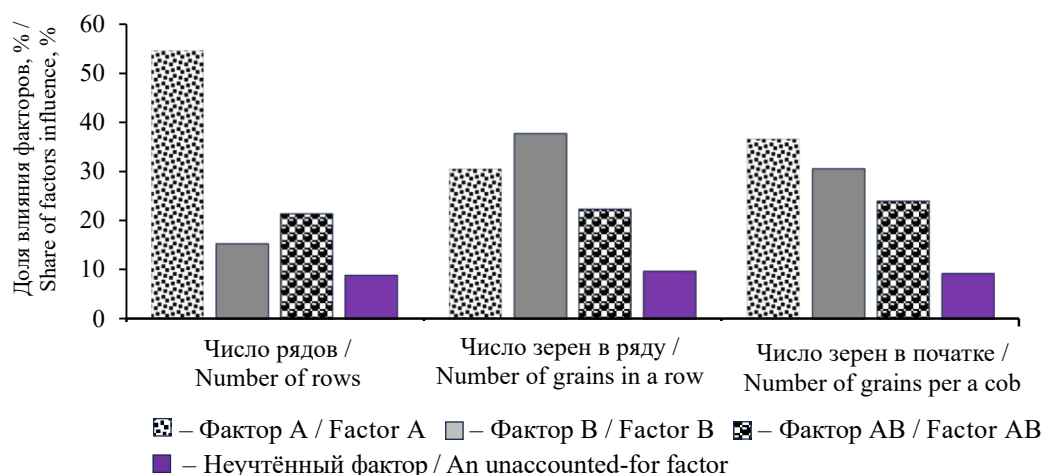


Рис. 2. Доля влияния факторов «генотип» (А), «год» (В), их взаимодействия (АВ) и неучтённого фактора (остаточного) на изменчивость числа рядов, числа зерен в ряду, числа зерен в початке, % /

Fig. 2. The share of influence of the factors “genotype” (A), “year” (B), their interaction (AB) and the unknown factor (residual) on the variability of number of rows, number of grains in a row, number of grains per a cob, %

Можно сделать предварительный вывод, что фактор «генотип» оказывает существенное влияние на изменчивость длины початка и количество рядов на нем (>50 %), а фактор «год» – на изменчивость диаметра женского соцветия (>40 %). Разница вклада изучаемых факторов на изменчивость длины озерненной

части початка, количества зерен в ряду и в початке не так значима и варьирует в пределах 22...37 %.

Результаты расчета двухфакторного анализа показали существенные различия между изучаемыми сортообразцами (табл. 2).

Таблица 2 – Результаты двухфакторного анализа по определению существенности воздействия факторов на элементы структуры початка коллекционных сортообразцов сахарной кукурузы (2021–2023 гг.) /
Table 2 – The results of two-factor analysis on identifying the significance of factors influence on the elements of the cob structure of sweet corn collection cultivar samples (2021–2023)

Фактор / Factor		Длина початка / Cob length	Длина озерненной части / Grained part of cob	Диаметр початка / Cob diameter	Количество рядов / Number of rows	Количество зерен / Number of grains	
						в ряду / in a row	в початке / per a cob
Генотип (А) / Genotype (A)	$F_{\text{факт.}} / F_{\text{факт.}}$	17,20*	13,68*	7,58*	22,11*	19,88*	25,28*
	HCP_{05} / LSD_{05}	1,02	1,06	0,26	0,71	2,43	32,77
Год (В) / Year (B)	$F_{\text{факт.}} / F_{\text{факт.}}$	45,13*	139,71*	462,86*	82,70*	563,98*	485,00*
	HCP_{05} / LSD_{05}	0,25	0,27	0,07	0,18	0,61	8,28
АВ	$F_{\text{факт.}} / F_{\text{факт.}}$	2,41*	7,46*	4,27*	4,32*	7,26*	8,26*
	HCP_{05} / LSD_{05}	1,76	1,85	0,46	1,23	4,21	56,76

* $F_{\text{факт.}} \geq F_{\text{теор.}}$ (здесь и далее) / * $F_{\text{факт.}} \geq F_{\text{теор.}}$ (here and further)

В результате сравнения по критерию Дункана¹⁴ также выявили различия частных средних для фактора «год» (табл. 3). Из данных таблицы видно, что высокие значения у большинства признаков генотипы формировали в 2022 г., наименьшие – в 2023 г.

Несмотря на выявленную разницу, в течение того или иного вегетационного периода сортообразцы формировались в идентичных условиях. Тем не менее непостоянство условий среды сказалось на значительной вариабельности признаков как отдельного генотипа, так и в среднем.

¹⁴Duncan D. B. Multiple Range and Multiple F Tests. Biometrics. 1955;11(1):1–42. DOI: <https://doi.org/10.2307/3001478>

Таблица 3 – Множественные сравнения частных средних по фактору «год» (В) (2021–2023 гг.) /
 Table 3 – Multiple comparisons of partial means by the factor "year" (B) (2021–2023)

Признак / Corn trait	2021 г.	2022 г.	2023 г.
Длина початка, см / Cob length, cm	12,88a	14,05b	12,83a
Длина озерненной части початка, см / Length of grained part of the cob, cm	11,85b	12,46c	9,61a
Диаметр початка, см / Cob diameter, cm	3,55b	4,23c	3,22a
Кол-во рядов на початке, шт. / Number of rows in a cob, pcs.	11,06a	12,15b	11,25a
Кол-во зерен в ряду, шт. / Number of grains per row, pcs.	26,17b	26,10b	17,04a
Кол-во зерен в початке, шт. / Number of grains per cob, pcs.	291,79b	317,82c	193,48a

Примечание: варианты, сопровождаемые одинаковыми латинскими буквами, различаются незначимо по критерию Дункана / Note: The note: variants marked by the same Latin letters differ insignificantly according to Duncan's criterion

В среднем за три года длина початка варьировала по сортообразцам от 8,06 до 16,09 см, а длина озерненной части – от 7,63 до 14,67 см (рис. 3). Минимальные значения признака «длина початка» выявили у генотипа к-23867, максимальные – к-4471. Высокие показатели отметили также у образцов: к-5768, к-4455, к-5811, Цукерка, Услада, к-4840, к-4444, к-5467. Из этих образцов значимую озерненность початка сформировали только Цукерка и к-4840. Диаметр женского соцветия более 4 см был отмечен у генотипов к-4471, к-4475, к-1976, Цукерка, к-4840, к-295 и к-5467. Число рядов на початке изменялось от 9,47 (к-1115) до 14,15 (к-4471) шт. Признак достаточно стабильный, слабо варьирующий по годам. Высокие показатели были установлены у генотипов: к-4462, к-4471, к-4472. Количество зерен в ряду более 30 шт. характеризовались образцы: к-4455, к-4471, к-4840.

Наибольшее внимание было уделено признаку «количество зерен в початке» как основного составляющего продуктивности и урожайности. Экстремумы его средних значений составили: min = 165,42 шт. и max = 435,86 шт. В среднем за три года высокие значения признака получили у генотипов: к-4455, к-4471, Цукерка, Услада (рис. 4). На представленной диаграмме можно наблюдать, что основное количество образцов, кроме к-23867, к-104, к-12831, к-4452 и РССК-87-5, сформировало наибольшее число зерновок в условиях 2022 г. (диапазон изменчивости средних значений составил 171,4 шт. (к-12831)...584,0 шт. (к-4471)). В 2023 г. фиксировали наиболее низкие показатели значений – 103,9 (к-5653)...472,8 (к-4471) шт. Вариабельность значений в 2021 г. составила 173,6 шт. (к-23261)...452,3 шт. (к-4468).

Несмотря на то, что вклад фактора «сорт» в вариабельность признака составил большую часть, тем не менее 63,51 % изменчивости определялись влиянием года, взаимодействием факторов и неучтенного фактора. Большинство образцов модельной популяции по-разному реагировали на погодные условия в годы исследований, что подтверждается как изменением общей средней, так и разным распределением выборки. Если в теплом и относительно влажном 2021 г. основная часть показателей признака была сконцентрирована вокруг средней, а коэффициенты асимметрии и эксцесса приближены к нулю ($As = -0,070 \pm 0,35$, $Ex = 0,080 \pm 0,69$ – распределение нормальное, наблюдалось небольшое левостороннее смещение), то в 2022 г. (с большим количеством осадков и колебанием температур) значения обладали более широким спектром, кривая распределения более пологая, а положительный коэффициент асимметрии указывал на преобладание показателей выше средней арифметической ($As = 0,302 \pm 0,35$, $Ex = -0,779 \pm 0,69$ – распределение нормальное, незначительное правостороннее смещение) (рис. 5). При более низких температурах и ограниченном количестве осадков 2023 г. наблюдали значимое правостороннее смещение значений в основном за счет единичных образцов с высокими показателями признака ($As = 0,992 \pm 0,35$, $Ex = 0,361 \pm 0,69$ – распределение значимо отличается от нормального).

Для создания перспективных и устойчивых селекционных форм необходимы доноры генов стабильности к воздействию неблагоприятных факторов среды. Для этих целей была проведена точечная оценка стабильности (Hi) генетических форм по признаку «количество зерен в одном початке», которая оценивается суммой нормированных отклонений признака генотипа от средних всех лет испытания.

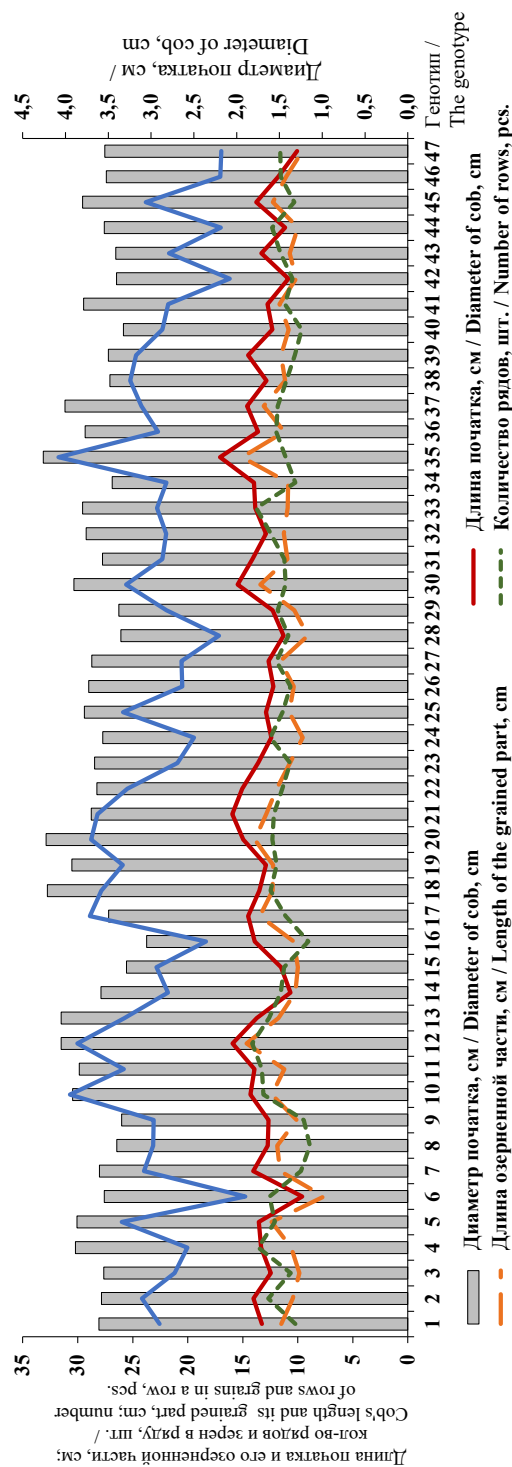


Рис. 3. Изменчивость значений элементов початка сортов сахарной кукурузы (коллекционный питомник, в среднем за 2021–2023 гг.) /
Fig. 3. Variability of the values of cob structure elements of sweet corn cultivar samples (collection nursery, on average for 2021–2023)

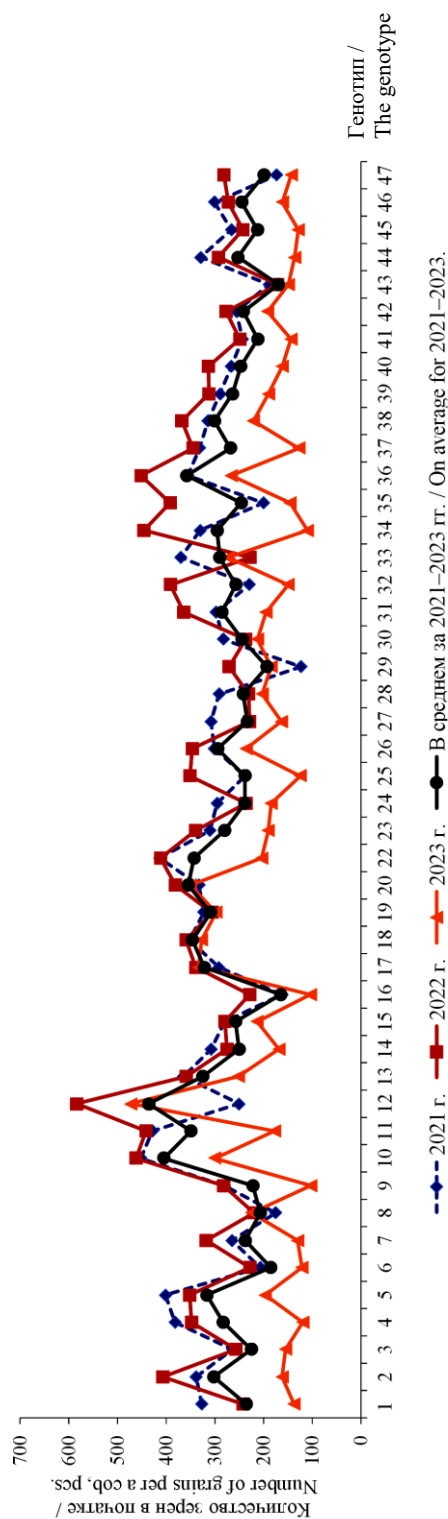


Рис. 4. Изменчивость значений признака «количество зерен в початке» по сортам сахарной кукурузы, шт. (коллекционный питомник, 2021–2023 гг.) /
Fig. 4. The variability of values of the “number of grains per a cob” trait for sweet corn cultivar samples, pcs. (collection nursery, 2021–2023)

Примечания / Notes: 1 – к-3151; 2 – к-1585, 3 – к-4411; 4 – к-4466; 5 – к-5768; 6 – к-23867; 7 – Алина / ‘Alina’; 8 – к-295; 9 – к-1115; 10 – к-4455; 11 – к-4468; 12 – к-4471; 13 – к-4475; 14 – к-4593; 15 – к-4604; 16 – к-5653; 17 – к-5811; 18 – к-1976; 19 – Забава / ‘Zabava’; 20 – Пукерка / ‘Tsukerka’; 21 – Услава / ‘Uslada’; 22 – Лаконка / ‘Lakomka’; 23 – Ранняя лаконка 121 / ‘Ranniyay lakomka 121’; 24 – Краснодарский сахарный 250 СВ / ‘Krasnodarskiy saharный 250 SV’; 25 – к-103; 26 – к-104; 27 – к-291; 28 – к-4452 (II); 29 – к-4442; 30 – к-4444; 31 – к-4452, 32 – к-4456, 33 – к-4472, 34 – к-295, 35 – к-4840, 36 – к-4472, 37 – к-5467, 38 – к-5691, 39 – к-5819, 40 – к-5835, 41 – к-12631, 42 – к-12831, 43 – к-13804, 44 – РССК 87-5, 45 – к-13807; 46 – к-23261; 47 – РССК 87-1

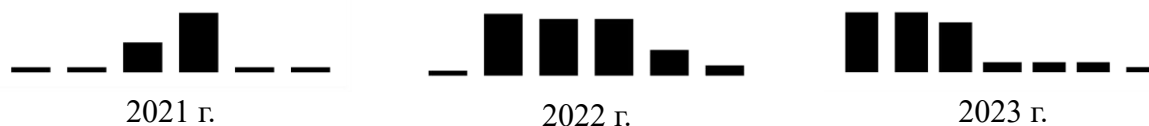


Рис. 5. Схема распределения сортообразцов сахарной кукурузы по признаку «количество зерен в початке» (2021–2023 гг.) /

Fig. 5. Distribution diagram of sweet corn cultivar samples by the “number of grains per a cob” trait (2021–2023)

В целом три года изучения характеризовались высокой вариабельностью показателей признака у изучаемых генотипов. В 2021 г. коэффициент вариации составил 24,7 %, в 2022 г. – 23,4 %, в 2023 г. – 37,79 %. Также рассчитали коэффициент вариации каждого сортообразца. Минимальный показатель выявили у сорта

Цукерка – 7,95 %. Слабую изменчивость отметили у образцов: к-1976, Забава, к-5811, к-4604, к-295 ($CV = 11,21 \dots 16,95$ %). Высокие значения коэффициента вариации ($CV > 30$ %) зафиксировали у генотипов: к-4471, Алина, к-5653, к-4472, к-13804, к-4468, к-1115, к-3151, к-1585, к-4462, Краснодарский сахарный 250, Услава.

Таблица 4 – Оценка стабильности (H_i) генотипов сахарной кукурузы к воздействию внешней среды по признаку «количество зерен в початке» (2021–2023 гг.) /

Table 4 – The evaluation of the stability (H_i) of sweet corn genotypes to environmental influence by the “number of grains per a cob” trait (2021–2023)

Сортообразец / Genotype	Выше средней / Higher than average)	Сортообразец / Genotype	Ниже средней / Lower than average
к-4471	7,68	РССК 87-1	-2,53
к-4455	5,20	к-23261	-2,58
Цукерка / ‘Tsukerka’	4,21	к-23867	-3,16
Цукерка (I3) / ‘Tsukerka’ (I3)	3,75	к-12831	-3,31
к-4840	3,40	к-5653	-3,98
к-5811	3,05	-	-
Сортообразец / Genotype	Средняя / Average	Сортообразец / Genotype	Средняя / Average
Услава / ‘Uslada’	2,38	к-12631	-0,77
к-4475	2,35	к-4452	-0,85
Забава / ‘Zabava’	2,35	Ранняя лакомка 121 / ‘Rannyya lakomka 121’	-0,87
к-4468	2,29	к-5819	-0,93
к-4456	1,62	к-13807	-0,95
к-5768	1,56	к-13804	-0,97
к-5467	1,28	к-4466	-1,02
к-103	1,24	к-104	-1,23
к-1585	0,70	к-295	-1,23
к-4444	0,54	к-3151	-1,43
Лакомка / ‘Lakomka’	0,36	к-295	-1,48
к-4604	-0,06	Алина / ‘Alina’	-1,54
к-4472	-0,08	к-4411	-1,61
к-5691	-0,13	Краснодарский сахарный 250 СВ / ‘Krasnodarskiy saharniy 250 SV’	-1,62
к-4462	-0,24	к-5835	-2,13
к-4442	-0,44	к-1115	-2,25
к-291	-0,59	РССК 87-5	-2,25
к-4472	-0,64	к-4441	-2,38
к-4593	-0,70	-	-

Примечания: $F_{\text{факт}} = 3,04^*$, $60,43^*$ и $8,89^*$ соответственно; доверительный интервал – 2,46 /

Notes: $F_{\text{факт}} = 3.04^*$, 60.43^* and 8.89^* resp.; confidence interval is 2.46

Точечная оценка стабильности (H_i) по С. П. Мартынову позволила выделить генетические формы с высокими стабильными средними показателями – к-4471, Цукерка, к-4455, к-4840, к-1976, к-5811 (табл. 4). Большинство изучаемых генотипов обладали средней степенью устойчивости к воздействию окружающей среды, и среди них наиболее стабильные – Услава, к-4475, Забава, к-4468, к-4456, к-5768, к-5467, к-103. У образца к-4471, несмотря на достаточно высокий коэффициент вариации ($CV = 35\%$), получена самая высокая точечная оценка стабильности – в условиях 2022 и 2023 гг. количество зерновок в початке было максимальным. Низкую изменчивость и относительно высокие, стабильные показатели признака выявили у генотипа саратовской селекции Цукерка – в течение трех лет опыта средние значения признака составили 317,84...396,72 шт.

Выводы. 1. В результате трёхлетнего исследования в засушливых условиях Саратовской области, согласно результатам дисперсионного анализа, определили долю влияния

факторов «генотип» (А), «год» (В), их взаимодействия (АВ), а также неучтенного фактора на изменчивость элементов структуры початка сортообразцов сахарной кукурузы. Установили, что на изменчивость длины початка, количества рядов и количества зерен в початке наибольшее влияние оказывает фактор «генотип» (55,70, 54,53 и 36,49 % соответственно); на диаметр початка и число зерен в ряду – фактор «год» (46,48 и 37,57 % соответственно); на длину озерненной части початка – взаимодействие факторов (32,87 %).

2. Выделены перспективные стабильные селекционные формы по признаку «количество зёрен в початке» – Цукерка, к-4455, к-4471, к-4840, к-1976, к-5811. Большинство изучаемых генотипов обладали средней степенью устойчивости к воздействию окружающей среды и среди них наиболее стабильные – Услава, к-4475, Забава, к-4468, к-4456, к-5768, к-5467, к-103, которые в дальнейшем будут использованы в скрещиваниях для оценки их селекционной ценности.

Список литературы

1. Бурак Л. Ч., Сапач А. Н. Использование крахмалосодержащего сырья в производстве пива и его влияние на качество готового продукта. Обзор зарубежной литературы. Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral». 2021;(3):3. DOI: <https://doi.org/10.24411/2658-3569-2021-10058> EDN: HZUANA
2. Витман В. Е., Баланов П. Е., Смотраева И. В. Исследование возможности применения российских сортов кукурузы для производства солода. Journal of Agriculture and Environment. 2024;5(45):1. DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.45.5> EDN: FYNXUM
3. Ленточкин А. М., Бабайцева Т. А. Глобальное потепление и изменение условий ведения растениеводства в Среднем Предуралье. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021;22(6):826–834. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.6.826-834> EDN: VWIIZQ
4. Дёмина И. Ф. Изменчивость и взаимосвязь селекционно-ценных признаков сортов и линий яровой мягкой пшеницы в условиях Среднего Поволжья. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023;24(5):739–748. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.739-748> EDN: MMQUTD
5. Корниенко А. В., Скачков С. И., Семенихина Л. В., Мельников Ю. Н. Адаптивность, устойчивость как направления селекции к изменяющимся условиям среды. Орошаемое земледелие. 2021;(2):17–21. DOI: <https://doi.org/10.35809/2618-8279-2021-2-12> EDN: HFNGJU
6. Жученко А. А. Адаптивное растениеводство (эколого-генетические основы) теория и практика. М.: Агрорус, 2008. 432 с.
7. Волков Д. П., Жужукин В. И., Зайцев С. А., Гудова Л. А., Гусева С. А., Носко О. С. Результаты экологического сортоиспытания новых среднеранних гибридов кукурузы (ФАО 250–299) в Нижнем Поволжье. Успехи современного естествознания. 2020;(4):22–29. DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37357> EDN: VLMIOO
8. Орлянская Н. А., Чеботарёв Д. С. Адаптивный потенциал исходного материала для селекции ранне-спелых гибридов кукурузы в условиях Центрально-Чернозёмного региона. Сахар. 2022;(12):20–24. DOI: <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2022-12-20-24> EDN: LXOFXP
9. Сотченко Е. Ф., Конарева Е. А. Корреляционная связь между хозяйственно полезными признаками у линий сахарной кукурузы. Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2024;26(3):103–111. DOI: <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2024-26-3-103-111> EDN: UWNPAF
10. Панфилов А. Э., Зезин Н. Н., Овчинников П. Ю. Биологическая продуктивность ультрананних гибридов кукурузы в различных почвенно-климатических зонах Уральского региона. Аграрный вестник Урала. 2022;(3(218)):35–47. DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2022-218-03-35-47> EDN: YEKOFT
11. Цаценко Л. В., Усова А. И., Хилько И. А. Аномалии развития у злаковых культур на примере кукурузы. Научный журнал КубГАУ. 2023;(192):240–252. DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-192-020> EDN: AUSHJS

12. Orteiz O. A., McMechan A. J., Robinson E., Hoegemeyer T., Howard R., Elmore R. W. Abnormal ear development in corn: Does hybrid, environment, and seeding rate matter? *Agronomy Journal*. 2023;(115(4)):1796–1811. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.21338>
13. Kumar A., Reddy K. S. Phenotypic and Genotypic Variability for Cob and Grain Characters in Maize (*Zea Mays* L.). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2024;8(3):1794–1798.
14. Ozata E. Evaluation of Fresh Ear Yield And Quality Performance In Super Sweet Corn. *International Journal of Life Sciences and Biotechnology*. 2019;2(2):80–94. URL: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/743000>
15. Jambang N., Hakim L., Witman S., Sunante I. A. Production and chemical quality of sweet corn with single fertilizer combination (SFC) on upland in West Papua. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023;1230:012052. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1230/1/012052>
16. Зайцев С. А., Жужукин В. И., Гудова Л. А., Волков Д. П., Гусева С. А., Носко О. С. Экологический подход в адаптированной системе селекции среднепоздних гибридов кукурузы (ФАО 300-399) в Нижнем Поволжье. *Аграрный научный журнал*. 2021;(3):19–24. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i3pp19-24> EDN: LITLEP
17. Логинова А. М., Губин С. В., Гетц Г. В. Изучение гибридов кукурузы разных групп спелости в условиях южной лесостепи Омской области. *АПК России*. 2021;28(3):326–331. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46642927> EDN: WUZIYQ
18. Кравцова Н. Н., Кравченко Р. В., Терехова С. С., Бардак Н. И. Агробиологические показатели кукурузы в зависимости от густоты стояния растений и протравителя семян. *Научный журнал КубГАУ*. 2020;(158):39–53. DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-158-004> EDN: FOBDC7

References

1. Burak L. Ch., Sapach A. N. The use of starch-containing raw materials in the production of beer and its influence on the quality of the finished product. review of foreign literature. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh nauk i tekhnologiy «Integral»* = International Journal of Applied Sciences and Technology Integral. 2021;(3):3. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/2658-3569-2021-10058>
2. Vitman V. E., Balanov P. E., Smotraeva I. V. A study of the possibility of using Russian maize varieties for malt production. *Journal of Agriculture and Environment*. 2024;5(45):1. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.45.5>
3. Lentochkin A. M., Babaytseva T. A. Global warming and change in the conditions of crop production practices in the Middle Cis-Urals. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2021;22(6):826–834. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.6.826-834>
4. Demina I. F. Variability and interrelation of breeding-valuable traits of varieties and lines of spring soft wheat in the conditions of the Middle Volga region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(5):739–748. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.5.739-748>
5. Kornienko A. V., Skachkov S. I., Semenikhina L. V., Melnikov Yu. N. Adaptability and resistance to changing environment conditions as directions of breeding. *Oroschaemoe zemledelie* = Irrigated Agriculture. 2021;(2):17–21. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35809/2618-8279-2021-2-12>
6. Zhuchenko A. A. Adaptive crop production (ecological and genetic foundations) theory and practice. Moscow: *Agrorus*, 2008. 432 p.
7. Volkov D. P., Zhuzhukin V. I., Zaytsev S. A., Gudova L. A., Guseva S. A., Nosko O. S. Environmental test results of the new mid-medium corn hybrids (FAO 250-299) in the lower Volga region. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2020;(4):22–29. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17513/use.37357>
8. Orlyanskaya N. A., Chebotarev D. S. Adaptive potential of the source material for breeding early-maturing corn hybrids in the conditions of the Central Chernozem region. *Sakhar* = Sugar. 2022;(12):20–24. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2022-12-20-24>
9. Sotchenko E. F., Konareva E. A. Correlation between economically useful traits in sugar corn lines. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN* = Izvestia of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V. M. Kokov. 2024;26(3):103–111. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35330/1991-6639-2024-26-3-103-111>
10. Panfilov A. E., Zezin N. N., Ovchinnikov P. Yu. Biological productivity of ultra-early corn hybrids in various soil and climatic zones of the Ural region. *Agrarnyy vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals. 2022;(3(218)):35–47. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2022-218-03-35-47>
11. Tsatsenko L. V., Usova A. I., Khilko I. A. Anomalies of development in cereals on the example of corn. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* = Scientific Journal of KubSAU. 2023;(192):240–252. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-192-020>
12. Orteiz O. A., McMechan A. J., Robinson E., Hoegemeyer T., Howard R., Elmore R. W. Abnormal ear development in corn: Does hybrid, environment, and seeding rate matter? *Agronomy Journal*. 2023;(115(4)):1796–1811. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.21338>
13. Kumar A., Reddy K. S. Phenotypic and Genotypic Variability for Cob and Grain Characters in Maize (*Zea Mays* L.). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. 2024;8(3):1794–1798.

14. Ozata E. Evaluation of Fresh Ear Yield And Quality Performance In Super Sweet Corn. *International Journal of Life Sciences and Biotechnology*. 2019;2(2):80–94. URL: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/743000>
15. Jambang N., Hakim L., Witman S., Sunante I. A. Production and chemical quality of sweet corn with single fertilizer combination (SFC) on upland in West Papua. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023;1230:012052. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1230/1/012052>
16. Zaytsev S. A., Zhuzhukin V. I., Gudova L. A., Volkov D. P., Guseva S. A., Nosko O. S. Ecological approach in the adapted breeding system of mid-late maize hybrids (FAO 300-399) in the lower Volga region. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2021;(3):19–24. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2021i3pp19-24>
17. Loginova A. M., Gubin S. V., Getts G. V. Studying the corn hybrids of different ripeness groups in the southern forest-steppe of Omsk region. *APK Rossii* = Agro-Industrial Complex of Russia. 2021;28(3):326–331. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46642927>
18. Kravtsova N. N., Kravchenko R. V., Terekhova S. S., Bardak N. I. Agro-biological indicators of corn depending on the dense of plant standing and seed protector. *Nauchnyy zhurnal KubGAU* = Scientific Journal of KubSAU. 2020;(158):39–53. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21515/1990-4665-158-004>

Сведения об авторах

✉ **Гусева Светлана Александровна**, старший научный сотрудник отдела кукурузы и зернобобовых культур, ФГБНУ «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы», 1-й Институтский пр-д., д. 4, г. Саратов, Российская Федерация, 410050, e-mail: rossorgo@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7006-0429>, e-mail: s.guseva76@mail.ru

Носко Оксана Сергеевна, младший научный сотрудник отдела кукурузы и зернобобовых культур, ФГБНУ «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы», 1-й Институтский пр-д., д. 4, г. Саратов, Российская Федерация, 410050, e-mail: rossorgo@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3120-1764>

Башинская Оксана Сергеевна, ведущий научный сотрудник отдела кукурузы и зернобобовых культур, ФГБНУ «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы», 1-й Институтский пр-д., д. 4, г. Саратов, Российская Федерация, 410050, e-mail: rossorgo@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9553-9994>

Бабушкин Денис Дмитриевич, младший научный сотрудник отдела кукурузы и зернобобовых культур, ФГБНУ «Российский научно-исследовательский и проектно-технологический институт сорго и кукурузы», 1-й Институтский пр-д., д. 4, г. Саратов, Российская Федерация, 410050, e-mail: rossorgo@yandex.ru

Information about the authors

✉ **Svetlana A. Guseva**, senior researcher, the Department of Corn and Legumes, Russian Research, Design and Technology Institute of Sorghum and Corn, 1-th Institutskiy pr-d, 4, Saratov, Russian Federation, 410050, e-mail: rossorgo@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7006-0429>, e-mail: s.guseva76@mail.ru

Oksana S. Nosco, junior researcher, the Department of Corn and Legumes, Russian Research, Design and Technology Institute of Sorghum and Corn, 1-th Institutskiy pr-d, 4, Saratov, Russian Federation, 410050, e-mail: rossorgo@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3120-1764>

Oksana S. Bashinskaya, leading researcher, the Department of Corn and Legumes, Russian Research, Design and Technology Institute of Sorghum and Corn, 1-th Institutskiy pr-d, 4, Saratov, Russian Federation, 410050, e-mail: rossorgo@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9553-9994>

Denis D. Babushkin, junior researcher, the Department of Corn and Legumes, Russian Research, Design and Technology Institute of Sorghum and Corn, 1-th Institutskiy pr-d, 4, Saratov, Russian Federation, 410050, e-mail: rossorgo@yandex.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

Морфобиологические особенности и агрономические достоинства нового сорта яблони Розочка

© 2025. Д. Д. Тележинский¹✉, А. В. Шлявас²

¹ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Екатеринбург, Российская Федерация

²ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Сорт яблони Розочка, созданный селекционерами Свердловской селекционной станции садоводства Л. А. Котовым и Д. Д. Тележинским, в 2023 году включён в Государственный реестр селекционных достижений, рекомендованных для использования в Волго-Вятском регионе. Селекционная работа и сортоизучение проводились в 1990–2020 гг. Полученный путём гибридизации сортов Серебряное Копытце и Орловим, он отличается высокими показателями урожайности (до 12,2 т/га), отличной зимостойкостью и устойчивостью к парше. Плоды сорта средние по размеру, вес их варьирует от 85 до 130 г, обладают правильной плоскоокруглой формой и гладкой поверхностью. Основной цвет кожицы – зеленовато-жёлтый, однако значительная часть поверхности покрыта красновато-тёмным румянцем. Мякоть плодов белая, умеренной плотности, мелкозернистая, сочная, легко ломающаяся. Вкус приятный, хорошо сбалансированный, кисло-сладкий, с лёгким ароматом. Урожай созревает в конце лета, срок хранения в контролируемых условиях составляет до 60 дней. Плоды сорта универсальны: можно использовать в свежем виде и для переработки.

Ключевые слова: *Malus domestica*, Волго-Вятский регион, современная селекция, летний срок созревания

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (тема №0532-2023-0003) и ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова» (тема №FGEM-2022-0004).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Тележинский Д. Д., Шлявас А. В. Морфо-биологические особенности и агрономические достоинства нового сорта яблони Розочка. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(1):82–89.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.82-89>

Поступила: 15.01.2025

Принята к публикации: 15.02.2025

Опубликована онлайн: 26.02.2025

Morphobiological features and agronomic advantages of the new apple cultivar ‘Rozochka’

© 2025. Dmitriy D. Telezhinskiy¹✉, Anna V. Shlyavas²

¹Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation

²Federal Research Center the N. I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Saint-Petersburg, Russian Federation

The apple cultivar ‘Rozochka’ developed by the breeders of Sverdlovsk Horticultural Breeding Station L. A. Kotov and D. D. Telezhinskiy, was included in the State Register of Breeding Achievements recommended for use in the Volga-Vyatka region in 2023. Breeding work and variety studies were carried out in 1990–2020. The cultivar ‘Rozochka’ obtained through hybridization of the ‘Serebryanoe kopytce’ and ‘Orlovim’ cultivars is characterized by high yields (up to 12.2 t/ha), excellent winter hardiness, and resistance to scab. The fruits are medium-sized, weighing from 85 to 130 g, with a correct flat-round shape and smooth surface. Their main color is greenish-yellow, but a significant part of the surface is covered with a reddish-dark blush. The flesh is white, moderately dense, fine-grained, juicy, and easily breakable. The taste is pleasant, well-balanced, sweet-sour, with a light aroma. The harvest ripens at the end of summer, and the storage period under controlled conditions can last up to 60 days. The fruits of this cultivar are versatile: they can be consumed fresh or used for further processing.

Keywords: *Malus domestica*, Volga-Vyatka region, modern selection, summer ripening period.

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 Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (theme No. 0532-2023-0003) and of Federal Research Center the N. I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (theme No. FGEM-2022-0004).

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: Telezhinskiy D. D., Shlyavas A. V. Morpho-biological features and agronomic advantages of the new apple cultivar 'Rozochka'. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):82–89. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.82-89>

Received: 15.01.2025

Accepted for publication: 15.02.2025

Published online: 26.02.2025

Яблоня (*Malus domestica* Borkh.) – это одна из популярных плодовых культур в мире благодаря приятному вкусу и высокой питательной ценности плодов, а также возможности выращивания в умеренных широтах [1]. В составе мякоти и кожицы плодов яблони содержатся витамины, углеводы, белки, пищевые волокна, минералы, фенольные соединения и другие вещества, благодаря которым данная культура обладает функциональными и полезными для здоровья человека свойствами, такими как противовоспалительный эффект, снижение уровня холестерина, предотвращение сердечно-сосудистых заболеваний и антиоксидантная активность [2, 3].

В Российской Федерации яблоня является ведущей плодовой культурой. По данным ФАО, яблоневые сады в 2022 г. занимали площадь более 234 тыс. га, валовой сбор составил 2,3 млн т¹. Основные площади промышленных яблоневых садов сосредоточены в Центральном, Центрально-Черноземном и Северо-Кавказском регионах (76 %)². Несмотря на эти показатели, рынок нашей страны все еще далек от насыщения. Потребление фруктов и ягод на душу населения значительно ниже рекомендованных медицинских норм. К тому же, на отечественном рынке в значительной степени представлена импортная продукция садоводства [4]. Поэтому, в настоящее время в рамках обеспечения продовольственной безопасности РФ есть необходимость продвижения культуры яблони в северные районы и введение в промышленное, фермерское и любительское садоводство сортов интенсивного типа, высокозимостойких, устойчивых к болезням, с хорошими товарными, вкусовыми, пищевыми и технологическими качествами плодов. Волго-Вятский регион, включающий Кировскую, Ниже-

городскую, Свердловскую области, Пермский край, республики Марий Эл, Удмуртская и Чувашская, по своим почвенно-климатическим условиям перспективен для решения этой проблемы [5]. По данным последней Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 г., в Волго-Вятском регионе площади под яблоней занимали 8188,5 га³.

В 2024 г. в Государственном реестре селекционных достижений, допущенных к использованию⁴, зарегистрировано 526 сортов яблони, из которых 42 включено по Волго-Вятскому региону, из них – 20 селекции Свердловской селекционной станции садоводства, в том числе и новый сорт Розочка.

Цель исследования – дать оценку биологическим и хозяйственным свойствам нового сорта яблони Розочка.

Научная новизна – представлены данные многолетнего изучения нового перспективного к выращиванию в отечественном садоводстве сорта яблони Розочка.

Материал и методы. Объект исследований – сорт яблони Розочка. Контролем служил наиболее близкий по срокам созревания, районированный с 1988 г. и широко распространенный сорт Серебряное копытце [6].

Селекционную работу и сортоизучение проводили в 1990–2020 гг. в Екатеринбурге на территории Свердловской селекционной станции садоводства – структурном подразделении Уральского федерального аграрного научно-исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук на уникальной научной установке коллекции живых растений открытого грунта «Генофонд плодовых, ягодных и декоративных культур на Среднем Урале»:

- 1990 г. – гибридизация сортов Серебряное Копытце и Орловим;

¹Продукты животноводства и сельскохозяйственных культур. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций ФАО. [Электронный ресурс].

URL: <https://www.fao.org/faostat/ru/#data/QCL/visualize> (дата обращения: 10.12.2024).

²Анализ рынка семечковых и косточковых культур. [Электронный ресурс].

URL: <https://belgorodinvest.com/upload/iblock/40d/ith4vmdp07nr0y7ext2t39ox9ynpigo0.pdf> (дата обращения: 10.12.2024).

³Итоги Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 года: в 8 т. Т. 4. Посевные площади сельскохозяйственных культур и площади многолетних насаждений и ягодных культур. Кн. 1. Площади сельскохозяйственных культур и многолетних насаждений. М.: ИИЦ «Статистика России», 2018. 714 с.

⁴Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. [Электронный ресурс].

URL: <https://gossortrf.ru/publication/reestry.php> (дата обращения: 10.12.2024).

- 1991–1993 г. – выращивание гибридных сеянцев в селекционном питомнике;

- 1993–2015 г. – выращивание гибридных сеянцев в селекционном саду;

- 2000–2015 г. – оценка гибридных сеянцев, отбор перспективных и элитных сеянцев;

- 2009–2020 г. – оценка перспективных и элитных сеянцев в опыте первичного сортоизучения;

- 2020 г. – передача сорта на государственное сортоизучение;

- 2022 г. – государственная экспертная оценка сорта. Передача во Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н. И. Вавилова черенков и гербария для создания эталонных образцов⁵;

- 2023 г. – районирование сорта Розочка по Волго-Вятскому региону.

Опыт первичного сортоизучения заложен весной в 2009 г. по схеме 6×3 м двухлетними саженцами, полученными способом окулировки на сеянцы Ранетки Пурпуровой.

Устойчивость к болезням, зимостойкость, лежкость плодов определяли согласно общепринятым методикам⁶. Морфологическое описание составлено по методике проведения испытаний на отличимость, однородность и стабильность⁷. Биохимический анализ выполняли в биохимической лаборатории Уральской государственной лесотехнической академии (Екатеринбург, Россия) в 2017–2019 гг. Содержание сухого вещества в плодах определяли путем их высушивания в термостате до постоянной массы с последующим вычислением разницы между исходной массой и массой сухого остатка. Общую кислотность измеряли титрованием пробы 0,1-нормальным раствором NaOH с использованием индикатора фенолфталеина. Содержание аскорбиновой кислоты находили титрованием пробы раствором краски Тильманса, содержание сахаров – по методу Бертрана⁸.

Оценку степени лежкости плодов проводили с использованием холодильной камеры Ариада Рапсодия R1400M без регулируемой газовой среды при температуре 0...3 °С.

Статистическую обработку полученных данных выполняли методом дисперсионного анализа с использованием программы Microsoft Excel согласно методике полевого опыта⁹.

Климатические условия места проведения исследований. В отличие от южной зоны традиционного садоводства, где зимы мягкие, а вегетационный период длинный и теплый, климатические условия Среднего Урала отличаются длинными суровыми зимами и коротким прохладным вегетационным периодом. Многие сорта плодовых культур из более южных регионов не успевают здесь закончить свой рост, пройти закалку и вымерзают в зимний период. Средняя температура января в этом регионе составляет -15...-16 °С, в суровые зимы, которые случаются один раз в 7–10 лет, температура может опускаться ниже -40 °С, зафиксированный температурный минимум -47,1 °С. Длительность безморозного периода составляет около 110 дней. Сумма активных температур – около 1800 °С.

Через Средний Урал с севера на юг от Северного ледовитого океана проходит Уральский горный хребет, его длина составляет около 2,5 тысяч км. Благодаря этой особенности рельефа довольно часто происходят забросы холодных воздушных масс с севера и климат Среднего Урала отличается резкими изменениями погоды: внезапными похолоданиями и заморозками. Последние весенние заморозки часто бывают в первой половине июня, а первые осенние – уже в третьей декаде августа.

Весенний период характеризуется частыми возвратными заморозками вплоть до 10 июня. Лето чаще бывает дождливое и прохладное, засухи случаются довольно редко – один раз в пять лет – обычно в первой половине лета. Средняя температура июля – +19,1 °С.

⁵Правила составления и подачи заявки на допуск селекционного достижения к использованию [Электронный ресурс]. URL: <https://gossortrf.ru/upload/2019/08/Pravila-sostavleniya-zayavki-na-dopusk.pdf> (дата обращения: 10.12.2024).

⁶Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур. Орел: изд-во Всероссийского НИИ селекции плодовых культур, 1999. 608 с.

⁷Методика проведения испытаний на отличимость, однородность и стабильность. Яблоня (только плодовые сорта). [Электронный ресурс]. URL: https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fgossortrf.ru%2Fupload%2Fmetodic%2FR0014_2.doc&wdOrigin=BROWSELINK (дата обращения: 10.12.2024).

⁸Методы биохимического исследования растений. Изд. 3-е, перераб. и доп. Под ред. А. И. Ермакова. Л.: Агропромиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. 430 с.

⁹Доспехов Б. А. Методика полевого опыта: с основами статистической обработки результатов исследований. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Колос, 1979. 416 с.

Осенний период, по среднесезонным данным за последние 20 лет, довольно дождливый и прохладный. Переход средней дневной температуры в отрицательные значения происходит обычно в конце октября-первой декаде ноября¹⁰.

Условия перезимовки яблони за последние 20 лет характеризовались как относительно благоприятные. Самый холодный период отмечен в 2010 г., когда в январе стояли морозы от -35 до -40 °С в течение 10 дней.

Результаты и их обсуждение. В 2023 г. в Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию по Волго-Вятскому региону, включен новый сорт яблони летнего срока созревания Розочка. Авторы – Л. А. Котов, Д. Д. Тележинский. Сорт Розочка (селекционный номер ДЛ П-14/120) получен при скрещивании сортов Серебряное Копытце и Орловим (рис. 1).

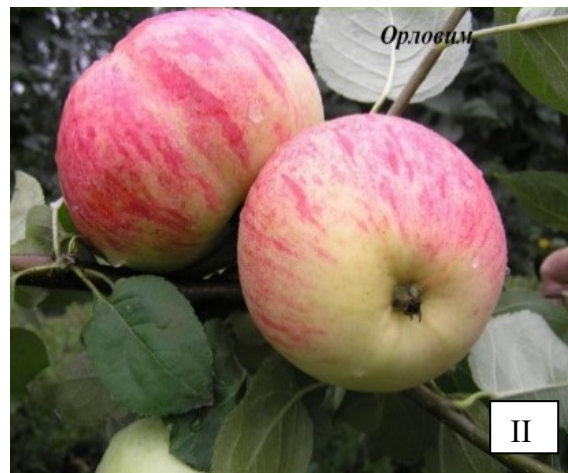


Рис. 1. Родительские сорта селекционного номера ДЛ П-14/120 (сорт Розочка): I – Серебряное Копытце (фото Д. Д. Тележинского); II – Орловим (фото А. М. Галашевой) /

Fig. 1. Parent cultivars of the breeding number DL П-14/120 ('Rozochka' cultivar): I – 'Serebryanoe Kopytce' (photo by D. D. Telezhinskiy); II – 'Orlovim' (photo by A. M. Galasheva)

В происхождении сорта участвовали (рис. 2): сорта народной селекции Центральной России и Сибири, характеризующиеся высокой зимостойкостью, долговечностью – Папировка, Антоновка Обыкновенная, Анис Бархатный, Титовка, Янтарка Алтайская, Ранетка Кизерская, кроме того Папировка и Анис Бархатный ценятся за высокие вкусовые качества плодов; сорта североамериканской селекции – Red Melba и Wolf River, отличающиеся высокой зимостойкостью в средней полосе; вид *Malus atrosanguinea* 804 – донор устойчивости к парше (*Rvi5*) [6, 7, 8, 9].

Гибридизацию проводили в 1990 г., семена высеяны на селекционные гряды в 1991 г. Элитные сеянцы отбирали в 2000 г. Сеянец ДЛ П-14/120 был отобран по признакам высокого уровня качества плодов и устойчивости к парше. Исходя из происхождения и отсут-

ствия признаков поражения паршой предполагаем, что в геноме сорта Розочка присутствует ген *Rvi5*, который имеется у отцовской исходной формы Орловим [6, 10]. Данный ген дает устойчивость к поражению четырьмя расами парши и, к сожалению, в некоторых более южных регионах садоводства эта устойчивость уже преодолена [8], но на Среднем Урале она ещё сохраняется. За период исследований сорт Розочка не повреждался паршой плодов и листьев, даже в годы эпифитотии (2011, 2014, 2015, 2017) в отличие от Серебряного копытца, который имел поражение в эти годы 2 балла.

Средняя продуктивность сорта Розочка за период изучения составила 21,9 кг с одного дерева, что больше, чем у контрольного (табл. 1). Средняя урожайность сорта Розочка за 4 года наблюдений существенно (на 5%-ном уровне значимости) превышала контроль.

¹⁰Агроклиматические ресурсы Свердловской области: справочник. И. Г. Качева, О. Б. Федотова, Г. С. Халевицкая [и др.]. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 158 с.

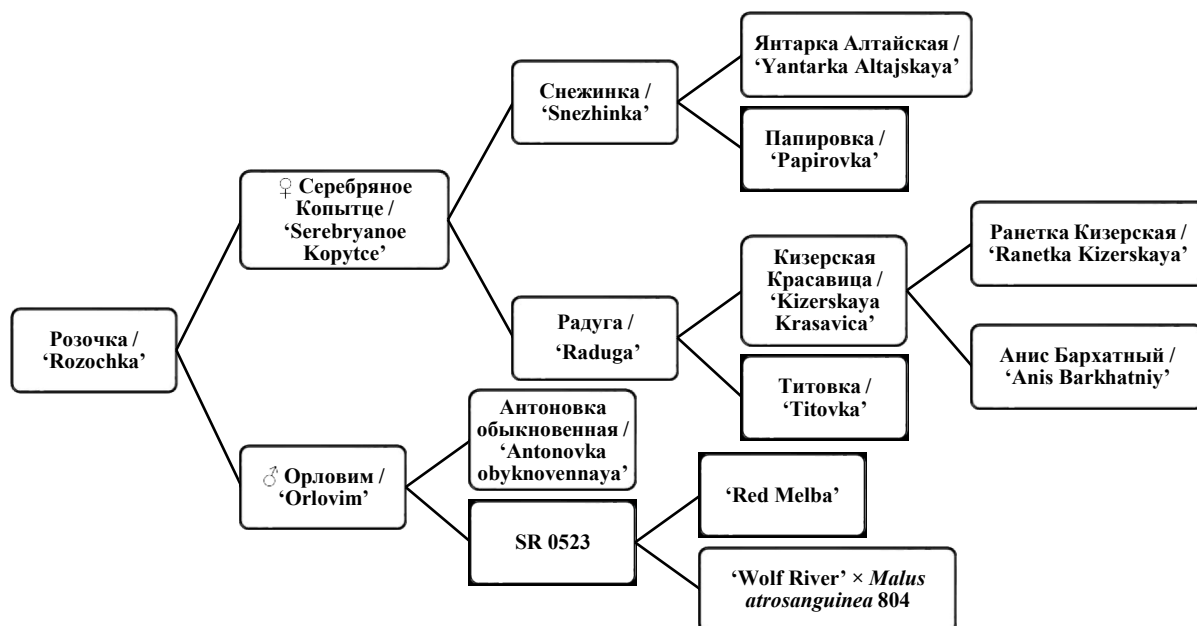


Рис. 2. Генеалогия сорта яблони Розочка /
Fig. 2. Genealogy of the apple cultivar 'Rozochka'

Таблица 1 – Урожайность сортов яблони Розочка и Серебряное копытце (Екатеринбург, 2017–2020 гг.) /
Table 1 – Yield of apple cultivars 'Rozochka' and 'Serebryanoe Kopytce' (Yekaterinburg, 2017–2020)

Параметр / Parameter	Розочка / 'Rozochka'					Серебряное копытце (к) / 'Serebryanoe Kopytce' (с)				
	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	среднее / average	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	среднее / average
Возраст дерева, лет / Age of the tree, years	11	12	13	14	-	11	12	13	14	-
Продуктивность, кг/дерево / Yield, kg/tree	19,7	22,0	24,0	22,0	21,9	18,1	19,6	20,6	16,4	18,7
Урожайность, т/га / Yield, t/ha	10,9	12,2	13,3	12,2	12,2	10,1	10,9	11,4	9,1	10,4
Количество деревьев на га / Number of trees per hectare	555,5					555,5				
НСР ₀₅ / LSD ₀₅	1,7*									

*Наименьшая существенная разность между средней урожайностью сортов Розочка и Серебряное копытце при 95%-ном уровне вероятности /

*The least significant difference of average yield of 'Rozochka' and 'Serebryanoe Kopytce' cultivars at the 95% probability level

По сравнению с контрольным сортом (табл. 2) плоды яблони Розочка крупнее и имеют более продолжительный период хранения в условиях холодильной камеры – не менее 60 дней, по вкусу более сладкие по сравнению с сортом Серебряное копытце, хотя содержание сахаров у них почти одинаковое, а кислот в два раза меньше. Плоды сорта Розочка, в отличие от многих других летних сортов, имеющих более рыхлую мякоть, очень хорошо подходят для отжима сока на соковыжималках центрифужного типа [11, 12].

По результатам изучения составлено полное помологическое описание сорта.

Дерево среднерослое (5,0 м), с округлой формой кроны средней густоты. Скелетные ветви прямые с коричневой корой, направлены вверх (рис. 3). Однолетние побеги коричнево-бурые, средние, прямые, опушенные с небольшим количеством мелких чечевичек. Листья среднего размера, зеленые, округлые, длинно-заостренные, гладкие, матовые с округлым основанием. Листовая пластинка слабоопушенная, выпуклая, изогнута вверх. Зазубренность краев мелкогородчатая. Черешок средний, опушенный, прилистники малые, ланцетовидные (рис. 4).

*Таблица 2 – Показатели плодов сортов яблони Розочка и Серебряное копытце (Екатеринбург, 2017–2020 гг.) /
Table 2 – Fruit indicators of ‘Rozochka’ and ‘Serebryanoe Kopytce’ apple cultivars (Yekaterinburg, 2017–2020)*

<i>Параметр / Parameter</i>	<i>Розочка / ‘Rozochka’</i>	<i>Серебряное копытце (к) / ‘Serebryanoe Kopytce’ (c)</i>
Масса плода, г / Fruit weight, g:		
- средняя / average	85	78
- максимальная / maximum	130	100
Привлекательность внешнего вида, балл / Attractiveness of the appearance, points	5	5
Сочность и консистенция мякоти / Juiciness and consistency of the pulp	Сочная, хрустящая / Juicy, crispy	
Продолжительность хранения плодов при t = 0...3 °С, дни / Duration of fruit storage at t = 0...3 °C, days	60	30
Биохимический состав плодов / Biochemical composition of fruits:		
- сухое вещество, % / dry substance, %	12,3	12,5
- сумма сахаров, % / sugars, %	10,3	10,2
- титруемая кислотность, % / titratable acidity, %	0,4	0,8
- аскорбиновая кислота, мг/100 г / ascorbic acid, mg/100 g	10,9	12,5
Дегустационная оценка, балл / Tasting evaluation, point		
- в свежем виде / fresh pulp	4,6	4,5
- сок / juice	4,7	4,5



*Рис. 3. 14-летнее плодоносящее дерево
яблони сорта Розочка (фото Т. Н. Слепневой) /
Fig. 3. 14-year-old fruit bearing apple tree of
‘Rozochka’ cultivar (photo by T. N. Slepneva)*

Преобладающий тип плодовых образований – простые и сложные кольчатки (рис. 5). Плоды (рис. 6) – средняя масса 85 г, максимальная – 130 г, одномерные, правильной плоскоокруглой формы, гладкие. Кожица средняя, прочная, гладкая, сухая, тусклая.



*Рис. 4. Листья яблони сорта Розочка
(фото Д. Д. Тележинского) /
Fig. 4. Leaves of the apple cultivar ‘Rozochka’
(photo by D. D. Telezhinskiy)*

Основная окраска зеленовато-желтая, покровная – по большей части плода размытый и полосатый румянец красного и темно-красного цвета. Воронка мелкая, часто сжатая с двух сторон, оржавленность слабая, лучистая, плодоножка короткая. Блюдце плоское

с перлами. Чашечка закрытая, подчашечная трубка короткая, чашевидная. Сердечко репчатое, семенные камеры открытые, семена коричневые, средние, округло-яйцевидные. Мякоть белая, средней плотности, мелко-



Рис. 5. Плодоношение сорта яблони Розочка
(фото Т. Н. Слепневой) /

Fig. 5. Fructification of the apple cultivar
'Rozochka' (photo by T. N. Slepneva)

Срок созревания плодов позднелетний (конец августа), период потребления – не менее 60 дней. Плоды сорта универсальны: можно использовать в свежем виде и для переработки на соки. Отсутствует периодичность плодоношения. В условиях Среднего Урала сорт устойчив к парше.

Заключение. В результате многолетней работы уральские селекционеры вывели новый высокоурожайный и зимостойкий сорт яблони Розочка. В условиях Среднего Урала сорт

зернистая, сочная. Вкус хороший гармоничный кисло-сладкий с ароматом. Биохимический состав: сухое вещество 12,3 %, общие сахара 10,3 %, титруемые кислоты 0,4 %, аскорбиновая кислота 10,9 мг/100 г.



Рис. 6. Плоды сорта яблони Розочка
(фото Д. Д. Тележинского) /

Fig. 6. Fruits of the apple cultivar 'Rozochka'
(photo by D. D. Telezhinskiy)

не поражается паршой. Плоды ярко окрашенные, созревают в конце августа, вкус десертный кисло-сладкий, мякоть хрустящая скалывающаяся. Сохраняющиеся не менее 60 дней в контролируемых условиях плоды пригодны как для потребления в свежем виде, так и для производства сока. Сорт соответствует требованиям для выращивания в промышленном и любительском садоводстве Волго-Вятского региона и перспективен для зон со схожими почвенно-климатическими условиями.

Список литературы

1. Madhu G. S., Harish D., Mir J. I., Nabi S. U., Sharma O. C. Conservation and Use of Temperate Fruit and Nut Genetic Resources. Fruit and Nut Crops. Handbooks of Crop Diversity: Conservation and Use of Plant Genetic Resources. P. E. Rajasekharan, V. R. Rao (eds). Singapore: Springer, 2023. pp. 1–25. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-1586-6_6-1
2. Patocka J., Bhardwaj K., Klimova B., Nepovimova E., Wu Q., Landi M., et al. Malus domestica: A Review on Nutritional Features, Chemical Composition, Traditional and Medicinal Value. Plants. 2020;9(11):1408. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9111408>
3. Josimuddin S. K., Kumar M., Rastogi H. A review on nutritional and medicinal value of malus domestica with various activity. International Journal of Health Sciences. 2022;6(S4):7251–7265. DOI: <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6nS4.10163>
4. Савина О. В., Пентегов С. И. Обеспечение продовольственной безопасности России на основе развития плодово-ягодного подкомплекса АПК. Russian journal of management. 2024;12(1):226–238. DOI: <https://doi.org/10.29039/2409-6024-2024-12-1-226-238> EDN: VXIXEO
5. Буквич Р. М., Пайович И., Петрович Д. Р. Растениеводство в Волго-Вятском регионе и в Придунавье Сербии: сравнительный анализ и возможности сотрудничества. Вестник НГИЭИ. 2016;(10(65)):119–134. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27193432> EDN: WXBXSH
6. Помология: в 5-ти т. Т.1. Яблоня. Под общ. ред. акад. РАН Е. Н. Седова. М.: РАН, 2020. 634 с. Режим доступа: <https://new.ras.ru/work/publishing/monographs/pomologiya-v-5-ti-tomakh-t-i-yablonya/>
7. Криворучко В. П., Горбунов Ю. Н., Исачкин А. В., Крючкова В. А., Волкова О. Д. Коллекция яблони Главного ботанического сада им. Н. В. Цицина РАН. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018. 117 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47193133> EDN: PHMGNM
8. Красова Н. Г., Пикунова А. В., Галашева А. М. Оценка исходного материала генофонда яблони по устойчивости к парше. Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2020;(6):49–54. DOI: <https://doi.org/10.30850/vrsn/2020/6/49-54> EDN: CZLJKU

9. Корнеева С. А., Седов Е. Н., Янчук Т. В. Иммунные к парше колоновидные и триплоидные сорта яблони селекции ВНИИСПК. *Аграрная наука*. 2019;(S3):130–134.
DOI: <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2019-326-3-130-134> EDN: LDQBEF
10. Савельева Н. Н. Биологические и генетические особенности яблони и селекция иммунных к парше и колонновидных сортов. Мичуринск: ВНИИС (ВНИИГиСПР) им. И. В. Мичурина, 2016. 280 с.
11. Седов Е. Н., Левгерова Н. С., Салина Е. С., Серова З. М. Подбор и создание сортов яблони для сокового производства. *Сельскохозяйственная биология*. 2010;45(5):16–22.
Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15284758> EDN: MWMJXB
12. Kim T. H., Jung J. M., Lee W. H. Development and Optimization of a Real-Time Monitoring System of Small-Scale Multi-Purpose Juice Extractor. *Foods*. 2025;14(2):227. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14020227>

References

1. Madhu G. S., Harish D., Mir J. I., Nabi S. U., Sharma O. C. Conservation and Use of Temperate Fruit and Nut Genetic Resources. *Fruit and Nut Crops. Handbooks of Crop Diversity: Conservation and Use of Plant Genetic Resources*. P. E. Rajasekharan, V. R. Rao (eds). Singapore: Springer, 2023. pp. 1–25. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-1586-6_6-1
2. Patocka J., Bhardwaj K., Klimova B., Nepovimova E., Wu Q., Landi M., et al. *Malus domestica*: A Review on Nutritional Features, Chemical Composition, Traditional and Medicinal Value. *Plants*. 2020;9(11):1408.
DOI: <https://doi.org/10.3390/plants9111408>
3. Josimuddin S. K., Kumar M., Rastogi H. A review on nutritional and medicinal value of *malus domestica* with various activity. *International Journal of Health Sciences*. 2022;6(S4):7251–7265. DOI: <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6nS4.10163>
4. Savina O. V., Pentegov S. I. Ensuring food security in Russia based on the development of the fruit and berry subcomplex of the agro-industrial complex. *Russian journal of management*. 2024;12(1):226–238. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.29039/2409-6024-2024-12-1-226-238>
5. Bukvić R. M., Payović I., Petrović D. R. Farm production in Volga-Viatka region and Danube region: comparative analysis and possibilities of cooperation. *Vestnik NGIEI = Bulletin NGII*. 2016;(10(65)):119–134. (In Russ.).
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27193432>
6. Pomology. in 5 vol. Vol 1. The apple tree. Under the general edition of the academician of RAS E. N. Sedova. Moscow: RAS, 2020. 634 p. URL: <https://new.ras.ru/work/publishing/monographs/pomologiya-v-5-ti-tomakh-t-i-yablonya/>
7. Krivoruchko V. P., Gorbunov Yu. N., Isachkin A. V., Kryuchkova V. A., Volkova O. D. Apple Tree Collection of the N. V. Tsitsin Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences. Moscow: *Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK*, 2018. 117 p. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47193133>
8. Krasova N. G., Pikunova A. V., Galasheva A. M. Assessment of initial material of an apple tree gene pool to scab resistance. *Vestnik rossyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki = Vestnik of the Russian agricultural science*. 2020;(6):49–54. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30850/vrsn/2020/6/49-54>
9. Korneeva S. A., Sedov E. N., Yanchuk T. V. Scab immune columnar and triploid apple cultivars of VNIISPК breeding. *Agrarnaya nauka = Agrarian science*. 2019;(S3):130–134. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2019-326-3-130-134>
10. Savel'eva N. N. Biological and genetic features of apple trees and breeding of scab-resistant and columnar cultivars. Michurinsk: *VNIIS (VNIIGiSPR) im. I. V. Michurina*, 2016. 280 p.
11. Sedov E. N., Levgerova N. S., Salina E. S., Serova Z. M. Selection and creation of apple varieties for juice production. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya = Agricultural Biology*. 2010;45(5):16–22. (In Russ.).
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15284758>
12. Kim T. H., Jung J. M., Lee W. H. Development and Optimization of a Real-Time Monitoring System of Small-Scale Multi-Purpose Juice Extractor. *Foods*. 2025;14(2):227. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14020227>

Сведения об авторах

✉ **Тележинский Дмитрий Дмитриевич**, старший научный сотрудник, Свердловская селекционная станция садоводства – структурное подразделение ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», ул. Белинского, д.112а, Екатеринбург, Российская Федерация, 620142, e-mail: sadovodstvo@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4783-2029>, e-mail: ddt77@list.ru

Шлявас Анна Владимировна, младший научный сотрудник отдела генетических ресурсов плодовых культур, ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н. И. Вавилова», ул. Большая Морская, д.42, 44, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 190000, e-mail: secretary@vir.nw.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8009-6780>

Information about the authors

✉ **Dmitry D. Telezhinskiy**, senior researcher, Sverdlovsk Horticultural Breeding Station – structural subdivision of Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 116 a, Belinsky Street, Yekaterinburg, Russian Federation, 620142, e-mail: sadovodstvo@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4783-2029>, e-mail: ddt77@list.ru

Anna V. Shlyavas, junior researcher, the Department of Fruit Crops Genetic Resources, Federal Research Center the N. I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources, Bolshaya Morskaya Str., 42, 44, Saint-Petersburg, Russian Federation, 190000, e-mail: secretary@vir.nw.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8009-6780>

✉ – Для контактов / Corresponding author

Оценка исходных форм земляники на устойчивость к серой гнили в условиях Среднего Урала

© 2025. Е. Ю. Невоструева✉

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

Серая гниль – одно из основных вредоносных заболеваний земляники. Селекция на устойчивость к данному заболеванию по-прежнему начинается с выявления устойчивых фенотипов и использованием их в скрещиваниях. Так как земляника – полигенный, гетерозиготный вид, то для повышения результативности работы требуется проведение селекционной оценки исходных форм на устойчивость к серой гнили. В исследованиях участвовали сорта и формы селекции Свердловской селекционной станции садоводства – Дуэт, Форсаж, Гейзер, 1-14-10, 2-43-10, 3-44-10, 2-45-10, 3-45-10, 2-54-11, интродуцированные сорта Ольвия, Соловушка, ‘Belrubi’, ‘Cardinal’ и их гибридное потомство – 600 сеянцев 10 семей. Максимальное развитие серой гнили на исходных формах земляники наблюдали в годы эпифитотий – 2017, 2018, 2024. По итогам учетов только две формы 2-45-10 и 2-54-11 устойчивы к данному заболеванию. Оценка гибридного потомства проведена в 2024 году на естественном фитопатогенном фоне. По результатам селекционной оценки по выходу устойчивых к болезни сеянцев (29,0–34,1 %) выделились семьи, в происхождении обеих родительских форм которых участвовали сорта с плотными ягодами – Marmolada и Totem: 1-40-10 × 3-44-10; 2-43-10 × 2-54-11; Форсаж × 2-43-10. Использование в скрещиваниях устойчивых форм 2-45-10 и 2-54-11 (кроме семьи 2-43-10 × 2-54-11) дало более низкий выход сеянцев без признаков заболевания (6,3–16,7 %). В процессе исследований выделено 10 отборных сеянцев земляники, совмещающих в своем гено типе, кроме устойчивости к серой гнили, комплекс хозяйственно ценных признаков. Данные сеянцы представляют новый исходный материал для дальнейшей селекционной работы.

Ключевые слова: родительские формы, селекция, *Fragaria ananassa* Duch., *Botrytis cinerea* Pers., гибридное потомство, поражение ягод

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук» (тема № 0532-2021-0008).

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

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Невоструева Е. Ю. Оценка исходных форм земляники на устойчивость к серой гнили в условиях Среднего Урала. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(1):90–97.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.90-97>

Поступила: 24.12.2024

Принята к публикации: 03.02.2025

Опубликована онлайн: 26.02.2025

Evaluation of original strawberry forms for resistance to gray mold in the conditions of the Middle Urals

© 2025. Elena Yu. Nevosttrueva✉

Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Science, Ekaterinburg, Russian Federation

Gray mold is one of the main harmful diseases of strawberries. Breeding for resistance to this disease still begins with identifying resistant phenotypes and using them in crosses. Since strawberries are a polygenic, heterozygous species, then in order to increase the effectiveness of breeding work, it is necessary to conduct a breeding assessment of the original forms for resistance to gray mold. The studies involved cultivars and forms of breeding of the Sverdlovsk breeding station of horticulture – ‘Duet’, ‘Forsazh’, ‘Gejzer’ 1-14-10, 2-43-10, 3-44-10, 2-45-10, 3-45-10, 2-54-11, introduced cultivars ‘Ol’viya’, ‘Solovushka’, ‘Belrubi’, ‘Cardinal’ and their hybrid offspring – 600 seedlings of 10 families. The maximum development of gray mold on the original forms of strawberries was observed in the years of epiphytotic – 2017, 2018, 2024. According to the results of the surveys, only two forms 2-45-10 and 2-54-11 were resistant to this disease. The hybrid offspring was assessed in 2024 against a natural phytopathogenic background. According to the results of breeding assessment for the yield of disease-resistant seedlings (29.0–34.1 %), families were identified in the origin of both parental forms of which cultivars with dense berries participated – ‘Marmolada’ and ‘Totem’: 1-40-10 × 3-44-10; 2-43-10 × 2-54-11; ‘Forsazh’ × 2-43-10 (29.0–34.1 %). The use of resistant forms 2-45-10 and 2-54-11 in crossings (except for the family 2-43-10 × 2-54-11) gave a lower yield of seedlings without signs of the disease (6.3–16.7 %). During the research, 10 selected strawberry seedlings were selected, combining in their genotype, in addition to resistance to gray mold, a set of economically valuable traits. These seedlings represent new source material for further selection work.

Keywords: parental forms, breeding, *Fragaria ananassa* Duch., *Botrytis cinerea* Pers., hybrid offspring, berry damage

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 Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Science (theme No. 0532-2021-0008).

The author thanks the reviewers for their contribution to the expert assessment of this work.

Conflict of interests: the author declared no conflict of interests.

For citation: Nevostrueva E. Yu. Evaluation of original strawberry forms for resistance to gray mold in the conditions of the Middle Urals. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):90–97. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.90-97>

Received: 24.12.2024

Accepted for publication: 03.02.2025 Published online: 26.02.2025

Серая гниль – грибное заболевание, широко распространенное во всех регионах возделывания земляники и наиболее вредоносное. Возбудитель *Botritis cinerea* Pers. Поражает всю надземную часть растения, но наиболее характерно проявляется при поражении ягод. Первичное заражение спорами гриба происходит во время цветения земляники во влажную и прохладную погоду при температуре 18–20 °C, но гриб активен в широком диапазоне температур от 0 до 28 °C [1]. Возбудитель болезни, проникая в тычинки, основание лепестка и чашечку цветка, переходит в скрытую фазу заражения и возобновляет свою разрушающую деятельность в процессе созревания ягоды [2]. Развитие гриба связано со старением клеток растения-хозяина, так как при созревании в ягоде происходят изменения в составе клеточной стенки, метаболизме сахаров, синтезе гормонов, уровне антиоксидантов и антоцианов, которые способствуют снижению устойчивости к болезни [3, 4]. Вторичное заражение серой гнилью происходит при контакте больных ягод со здоровыми и протекает более ускоренно – в течение суток после контакта [2].

Защитные мероприятия против серой гнили в ягодоводстве предусматривают неоднократную обработку фунгицидами во время цветения насаждений земляники. Использование химических средств вызывает различные мутации у гриба, повышая его устойчивость к применяемым препаратам [5], и приводит к ухудшению экологической обстановки. В настоящее время используются и другие методы воздействия – биологические, включающие микробы, грибы, их биоактивные метаболиты, антиоксиданты, фенолы и т. д. [6, 7, 8]. Перспективно при хранении ягодной продукции использование ультрафиолета, озона, хлора, хитозана и других веществ [9]. Большинство данных методов находятся на стадии экспериментов и еще широко не внедрены в практическое ягодоводство.

Применение любых защитных средств требует значительного объема финансовых и

материальных затрат. Наиболее простым решением данной проблемы является возделывание устойчивых сортов земляники к серой гнили. С развитием технологий в сфере генетики предоставляется возможность определить гены устойчивости к данному заболеванию. В настоящее время уже выявлены гены-маркеры, ассоциирующиеся с устойчивостью к ряду грибных болезней, таких как фитофторозная кожистая гниль ягод, фитофторозная корневая гниль, мучнистая роса, антракнозная гниль, фузариозное увядание, и выделены сортообразцы земляники – источники устойчивости к этим заболеваниям [10, 11]. Исследования по генетике устойчивости земляники к серой гнили еще не дали положительных результатов. Этому способствует характеристика самого патогена, большое количество растений-хозяев, различные пути заражения и некротрофный образ жизни гриба. На данном этапе выявлено, что устойчивость земляники к серой гнили связана с биосинтезом аминокислот и гормонов в цветке, пониженным количеством сахаров в ягоде, ее повышенной кислотностью, высоким уровнем содержания проантоцианидинов (катехинов и эпикатехинов – составной частью сухих растворимых веществ ягоды, связанных с ее плотностью) [2, 12, 13]. Но низкое количество сахаров и высокая кислотность отрицательно влияют на оценку вкуса, что является нежелательным при выведении сортов для «свежего рынка», так как земляника – культура с предпочтительным потреблением ягод именно в свежем виде. В то же время содержание проантоцианидинов в ягоде можно использовать в качестве индикатора устойчивости к серой гнили в селекционной работе [13].

В практической селекции включение в гибридизацию устойчивых исходных форм, выявленных в годы эпифитотий, в настоящее время по-прежнему является актуальным. А так как земляника, как и другие полиплоиды, имеет полигенный контроль всех хозяйственно ценных признаков, поэтому исходные формы должны быть оценены по их гибриднему потомству,

потому что фенотип растения не всегда соответствует генотипу [14, 15]. И только по потомству появляется возможность определить ценность родительских форм при селекции на определенный признак, в данном случае – на устойчивость к серой гнили.

Цель исследований – селекционная оценка исходных форм земляники по устойчивости к серой гнили и выделение нового исходного материала для селекции.

Научная новизна – впервые в условиях Среднего Урала проведена селекционная оценка исходных форм земляники на устойчивость к серой гнили, выделены отборные формы без признаков поражения болезнью, представляющие новый исходный материал для дальнейшей селекции.

Материал и методы. Место проведения исследований – Свердловская селекционная станция садоводства – структурное подразделение ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН, УНУ «Генофонд плодовых, ягодных и декоративных культур на Среднем Урале» (Свердловская ССС ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН, г. Екатеринбург).

Объектами исследований в годы эпифитотий серой гнили (2017, 2018 и 2024 гг.) служили сортообразцы селекции станции – Дуэт, Форсаж, Гейзер, 2-45-10, 3-45-10, 2-54-11, 2-43-10, 3-44-10, 1-40-10; интродуцированные – Соловушка, Ольвия, Belrubi, Cardinal и гибридное потомство первого года плодоношения – 600 сеянцев 10 семей.

Наблюдения и учеты проводили в соответствии с общепринятыми методиками¹, согласно которым в годы эпифитотий устойчивыми к серой гнили являются сортообразцы земляники с максимальным поражением ягод до 10 % от урожая, среднеустойчивыми – 10–20 %, неустойчивыми – более 20 %. Для выявления корреляционных связей между поражением и основными биохимическими характеристиками ягод исходных форм использовали программу Microsoft Excel. Оценка гибридного потомства по степени подмерзания проводили во время отрастания перед цветением. Продуктивность сеянцев определяли в баллах

по количеству цветоносов на куст с учетом возраста растения: 1 шт. – 2 балла; 2 шт. – 3 балла; 3 шт. – 4 балла; 4 шт. и более – 5 баллов. Степень крупноплодности определяли по первым созревшим ягодам: 5 баллов – 30 и более г; 4 балла – 20–25 г; 3 балла – 10–19 г; 2 балла – 5–9 г. Отбор устойчивых к серой гнили сеянцев проводили по факту отсутствия признаков поражения ягод на естественном фитопатогенном фоне. Оценка биохимического состава ягод исходных форм земляники проводили в аналитической лаборатории ФГБНУ УрФАНИЦ УрО РАН согласно ГОСТам²: 33977-2016 (Определение общего содержания сухих растворимых веществ); 8756.13-87 (Определение сахаров); ISO 750-2013 (Определение титруемой кислотности).

Метеоусловия периодов цветения, формирования и созревания урожая земляники в 2017, 2018 и 2024 годы характеризовались как влажные, с выпадением осадков до 149–177 % от средней многолетней нормы (рис.).

При этом на степень поражения болезнью влиял и сам характер выпадения осадков – затяжные морозящие или ливневые дожди. Так, в 2017-2018 гг. в июне слабые дожди шли практически ежедневно (до 133 % от нормы), в июле – были ливни (104–114 % от нормы). В 2024 г. осадки в большинстве своем имели ливневый характер: в III декаде июня выпало 345 % от средней многолетней нормы, в конце июля – 188 %.

Повышенная влажность вызвала сильное развитие серой гнили ягод. В 2017 г. отмечены оба вида заражения (первичное и вторичное), в 2018 и 2024 гг. – в основном первичное во время цветения земляники.

Результаты и их обсуждение. Данные учетов поражения ягод серой гнилью исходных форм земляники представлены в таблице 1. За годы наблюдений два сеянца 2-45-10 и 2-54-11 отмечены устойчивыми к данному заболеванию, поражение ягод составило до 10 % от урожая. Остальные изучаемые сортообразцы вошли в группу неустойчивых с количеством больных ягод в общем урожае более 20 %.

¹Программа и методика селекции плодовых, ягодных и орехоплодных культур. Орел, 1995. С. 387–416; Программа и методика сортоизучения плодовых, ягодных и орехоплодных культур. Орел, 1999. С. 417–443.

²ГОСТ 33977-2016. Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения общего содержания сухих веществ. М.: Стандартинформ, 2017. 15 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293746/4293746554.pdf>; ГОСТ 8756.13-87. Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения сахаров. М.: Стандартинформ, 2010. 11 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294821/4294821427.pdf>; ГОСТ ISO 750-2013. Продукты переработки плодов и овощей. Методы определения титруемой кислотности. М.: Стандартинформ, 2018. 8 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293773/4293773999.pdf>

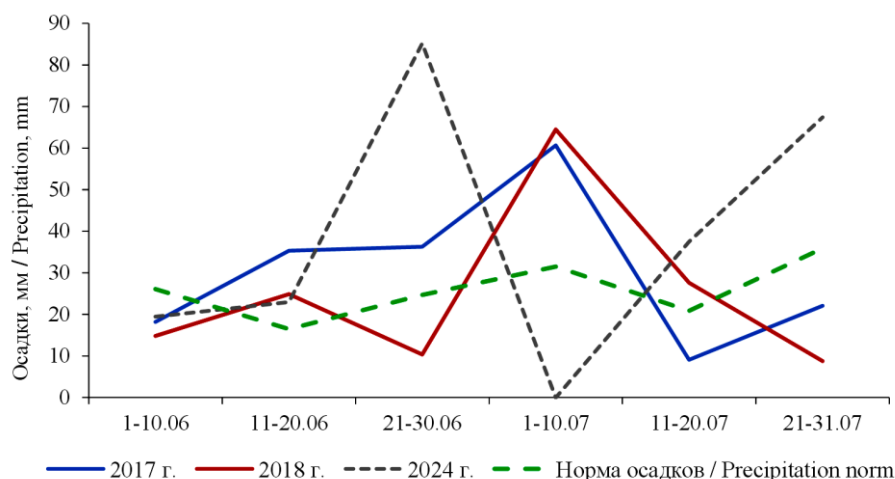


Рис. Выпадение осадков в периоды цветения и созревания земляники, мм /
Fig. Precipitation during the flowering and ripening periods of strawberries, mm

Таблица 1 – Поражаемость исходных форм земляники серой гнилью в годы эпифитотий, % /
Table 1 – Susceptibility of original strawberry forms to gray mold during epiphytotics, %

Исходная форма / Original form	Происхождение / Origin	Поражение серой гнилью / Gray mold infection			Максимальное поражение / Maximum damage
		2017 г.	2018 г.	2024 г.	
Устойчивые формы (до 10 %) / Resistant forms (up to 10 %)					
2-45-10	Соловушка × Dukat / ‘Solovushka’ × ‘Dukat’	5,8	6,0	8,9	8,9
2-54-11	Амулет × Marmolada / ‘Amulet’ × ‘Marmolada’	8,9	9,0	9,4	9,4
Неустойчивые формы (> 20 %) / Unstable forms (> 20 %)					
Дуэт/ ‘Duet’	Талка, свободное опыление / ‘Talka’, open pollination	21,4	14,0	12,7	21,4
‘Belrubi’	‘Pocahontas’ × ‘Redcoat’	16,2	22,0	17,6	22,0
‘Cardinal’	‘Earlibelle’ × Ark. 5063	25,1	20,0	11,3	25,1
2-43-10	Соловушка × Marmolada / ‘Solovushka’ × ‘Marmolada’	26,3	15,0	13,6	26,3
3-44-10	Соловушка × Totem / ‘Solovushka’ × ‘Totem’	25,4	17,0	28,7	28,7
1-40-10	Дуэт × Marmolada / ‘Duet’ × ‘Marmolada’	29,0	26,0	20,5	29,0
3-45-10	Соловушка × Dukat / ‘Solovushka’ × ‘Dukat’	29,3	19,0	18,5	29,3
Ольвия / ‘Ol’viya’	Присвята × 277-3-16 / ‘Prisvyata’ × 277-3-16	30,7	32,0	21,9	32,0
Форсаж / ‘Forsazh’	Соловушка × Totem / ‘Solovushka’ × ‘Totem’	23,6	36,0	23,4	36,0
Соловушка / ‘Solovushka’	Сюрприз Олимпиаде × Фестивальная ромашка / ‘Syurpriz Olimpiade’ × ‘Festival’naya romashka’	17,9	38,0	28,9	38,0
Гейзер / ‘Gejzer’	Арника, свободное опыление / ‘Arnika’, open pollination	27,9	43,0	40,7	43,0

Проведенный корреляционный анализ показал, что устойчивость к серой гнили у земляники в большей мере связана с повышенным содержанием сухих растворимых веществ, составной частью которых являются катехины ($r = -0,52$, связь средняя обратная при $p < 0,05$) (табл. 2). Данный вывод согласуется с исследованиями других авторов [13]. Влияние низкого содержания сахаров и высокой кислотности

на степень поражения ягод серой гнилью неоднозначно и требует уточнений.

Учеты по поражению серой гнилью ягод гибридного потомства проведены в 2024 г. (табл. 3). Выход сеянцев без признаков заражения от 29,0 до 34,1 % отмечен в семьях, в происхождении обеих родительских форм которых участвовали сорта с плотными ягодами – Marmolada, Totem: 1-40-10 × 3-44-10; 2-43-10 × 2-54-11; Форсаж × 2-43-10.

Таблица 2 – Зависимость между поражением серой гнилью и биохимическим составом ягод исходных форм земляники /

Table 2 – Relationship between gray mold damage and biochemical composition of berries of original strawberry forms

Исходная форма / Original form	Поражение ягод серой гнилью, % / Berry damage by gray mold, %	Биохимическая характеристика ягод, % / Biochemical characteristics of berries, %		
		сахаров / sugar	кислотность / acidity	сухие растворимые вещества / dry soluble substances
2-45-10	8,9	6,9	1,5	10,9
2-54-11	9,4	6,4	0,8	11,7
Дуэт / 'Duet'	21,4	5,5	1,2	9,0
Belrubi	22,0	6,6	1,0	11,1
Cardinal	25,1	5,6	1,0	11,9
2-43-10	26,3	6,0	1,6	11,3
3-44-10	28,7	5,8	1,7	11,2
1-40-10	29,0	6,1	0,9	10,4
3-45-10	29,3	6,0	1,5	10,7
Ольвия / 'Ol'viya'	32,0	6,6	1,1	11,2
Форсаж / 'Forsazh'	36,0	6,7	1,4	11,2
Соловушка / 'Solovushka'	38,0	6,0	1,8	9,4
Гейзер / 'Gejzer'	43,0	5,5	1,6	6,7
<i>r</i>	-	-0,38	0,46	-0,52

Таблица 3 – Результаты учетов на гибридном потомстве земляники по поражению ягод серой гнилью (2024 г.) /

Table 3 – Results of surveys of hybrid strawberry progeny for berry damage by gray rot (2024)

Семья / Family	Сеянцев в учете / Seedlings in the survey		
	всего, шт. / total, pcs.	в т. ч. без признаков поражения / including without signs of damage	
		шт.	%
1-40-10 (Дуэт × Marmolada) × 3-44-10 (Соловушка × Totem) / 1-40-10 ('Duet' × 'Marmolada') × 3-44-10 ('Solovushka' × 'Totem')	41	14	34,1
2-43-10 (Соловушка × Marmolada) × 2-54-11 (Амулет × Marmolada) / 2-43-10 ('Solovushka' × 'Marmolada') × 2-54-11 ('Amulet' × 'Marmolada')	65	19	29,2
Форсаж (Соловушка × Totem) × 2-43-10 (Соловушка × Marmolada) / 'Forsazh' ('Solovushka' × 'Totem') × 2-43-10 ('Solovushka' × 'Marmolada')	62	18	29,0
3-45-10 (Соловушка × Dukat) × 2-43-10 (Соловушка × Marmolada) / 3-45-10 ('Solovushka' × 'Dukat') × 2-43-10 ('Solovushka' × 'Marmolada')	48	12	25,0
Дуэт × Ольвия / 'Duet' × 'Ol'viya'	106	26	24,5
Гейзер × 2-45-10 (Соловушка × Dukat) / 'Gejzer' × 2-45-10 ('Solovushka' × 'Dukat')	42	7	16,7
Ольвия × 3-44-10 (Соловушка × Totem) / 'Ol'viya' × 3-44-10 ('Solovushka' × 'Totem')	37	4	10,8
2-45-10 (Соловушка × Dukat) × Cardinal / 2-45-10 ('Solovushka' × 'Dukat') × 'Cardinal'	39	4	10,3
Соловушка × 2-54-11(Амулет × Marmolada) / 'Solovushka' × 2-54-11 ('Amulet' × 'Marmolada')	48	3	6,3
Соловушка × Belrubi / 'Solovushka' × 'Belrubi'	112	3	2,7
Итого / Total	600	110	18,3

В семьях, где только одна из родительских форм имеет плотные ягоды, выход устойчивых сеянцев снижался.

Использование в скрещиваниях устойчивых к серой гнили исходных форм 2-45-10, 2-54-11 (кроме семьи 2-43-10 × 2-54-11) дало более низкий выход не пораженных болезнью сеянцев (6,3–16,7 %).

По выходу устойчивых сеянцев, сочетающих в своем генотипе и комплекс хозяйственно ценных признаков, выделились семьи с родительской формой Соловушка и ее производными – сортом Форсаж и сеянцами 2-43-10, 3-44-10, 2-45-10 (табл. 4). И также семья Дуэт × Ольвия. Количество таких сеянцев в семье – от 1 до 2 шт. В остальных изучаемых семьях устойчивых сеянцев с комплексом признаков не выявлено.

Таблица 4 – Распределение выделенных устойчивых сеянцев земляники по хозяйственно ценным признакам, шт. (2024 г.) /

Table 4 – Distribution of selected resistant strawberry seedlings according to economically valuable traits, pcs. (2024)

Семья / Family	Количество сеянцев без признаков поражения / Number of seedlings without signs of damage	В том числе сеянцев / Including seedlings			
		с подмерзанием 0-1 балл / with freezing 0-1 point	с плодоношением 4-5 баллов / with fruiting of 4-5 points	с крупноплодностью 4-5 баллов / with large-fruit-ness 4-5 points	с комплексом / with a complex
Форсаж × 2-43-10 / 'Forsazh' × 2-43-10	18	6	5	6	2
1-40-10 × 3-44-10	14	7	4	2	2
Соловушка × 2-54-11 / 'Solovushka' × 2-54-11	3	3	2	3	2
Дуэт × Ольвия / 'Duet' × 'Ol'viya'	26	14	12	3	1
2-43-10 × 2-54-11	19	11	7	10	1
2-45-10 × Cardinal	4	4	4	1	1
Соловушка × Belrubi / 'Solovushka' × 'Belrubi'	3	3	2	1	1
3-45-10 × 2-43-10	12	5	1	7	0
Гейзер × 2-45-10 / 'Gejzer' × 2-45-10	7	1	3	0	0
Ольвия × 3-44-10 / 'Ol'viya' × 3-44-10	4	1	1	2	0

Краткая характеристика данных сеянцев представлена в таблице 5. Отборные сеянцы в основном среднего и среднепозднего сроков созревания, что является положительным аспектом, так как наибольший вред серая гниль наносит сортам земляники этих сроков созревания.

Степень подмерзания устойчивых отборных сеянцев не превышала 0-1,0 балл. Данные сеянцы являются продуктивными и крупноплодными – степень плодоношения и крупноплодности на уровне 4,0-5,0 баллов. Боль-

шинство отборных сеянцев с ягодами хорошего кисло-сладкого вкуса – 4,3-4,4 балла. Более низкая оценка вкуса у сеянцев 1-01-22, 1-05-22 на уровне 4,0–4,2 балла.

Закключение. Селекционная оценка исходных форм земляники на устойчивость к серой гнили в условиях Среднего Урала в годы эпифитотий выявила корреляционную зависимость ($r = -0,52$, $p < 0,05$) между поражением серой гнилью сортообразцов, привлеченных в скрещивания, и содержанием сухих растворимых веществ в ягодах.

Таблица 5 – Краткая хозяйственно-биологическая характеристика отборных сеянцев земляники без признаков поражения серой гнилью (2024 г.) /
Table 5 – Brief economic and biological characteristics of selected strawberry seedlings without signs of gray rot (2024)

Сеянец / Seedling	Происхождение / Origin	Срок созревания / Ripening period	Подмер- зание / Freezing	Плодоно- шение / Fruiting	Крупноплод- ность / Large- fruitedness	Оценка вкуса ягод / Berry taste rating
			балл / point			
2-99-22	Дуэт × Ольвия / 'Duet' × 'Ol'viya'	Ранний / Early	1,0	5,0	4,0	4,4
2-00-22	Соловушка × Belrubi / 'Solovushka' × 'Belrubi'	Средний / Medium	0	5,0	4,0	4,4
1-01-22	2-43-10 × 2-54-11		1,0	4,0	5,0	4,0
1-04-22	1-40-10 × 3-44-10		0	5,0	4,0	4,4
2-04-22	1-40-10 × 3-44-10		0	4,0	4,0	4,3
1-05-22	2-45-10 × Cardinal		1,0	5,0	4,0	4,2
1-06-22	Форсаж × 2-43-10 / 'Forsazh' × 2-43-10	Поздний / Late	1,0	5,0	4,0	4,3
3-06-22	Форсаж × 2-43-10 / 'Forsazh' × 2-43-10	Средне- поздний / Mid-late	1,0	5,0	5,0	4,4
1-07-22	Соловушка × 2-54-11 / 'Solovushka' × 2-54-11		0	5,0	4,0	4,4
2-07-22	Соловушка × 2-54-11 / 'Solovushka' × 2-54-11		0	5,0	4,0	4,3

При оценке гибридного потомства изучаемых исходных форм выявлено, что наибольший выход устойчивых сеянцев (29,0–34,1 %) отмечен в семьях 1-40-10 × 3-44-10; 2-43-10 × 2-54-11; Форсаж × 2-43-10, в которых обе родительские формы имеют в своем происхождении формы с плотными ягодами – Marmolada и Totem. В семьях с устойчивыми к заболеванию исход-

ными формами 2-54-11 и 2-45-10 (кроме семьи 2-43-10 × 2-54-11) выход сеянцев без признаков поражения получили на уровне 6,3–16,7 %. Выделенные по результатам селекционной оценки 10 устойчивых сеянцев с комплексом хозяйственно ценных признаков, представляют новый исходный материал для дальнейшей селекционной работы.

Список литературы

1. Шаманская Л. Д. Вредители и болезни садов Сибири. Барнаул: Новый формат, 2018. С. 133–134.
2. Petrasch S., Knapp S. J., van Kan J. A. L., Blanco-Ulate B. Grey mould of strawberry, a devastating disease caused by the ubiquitous necrotrophic fungal pathogen *Botrytis cinerea*. *Molecular Plant Pathology*. 2019;20(6):877–892. DOI: <https://doi.org/10.1111/mpp.12794>
3. Guo J., Wang S., XiaoYang Y., Dong R., Li Y., Mei X., Shen Y. Polyamines regulate strawberry fruit ripening by ABA, IAA, and ethylene. *Plant Physiology*. 2018;177(1):339–351. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.18.00245>
4. Sánchez-Sevilla J. F., Vallarino J. G., Osorio S., Bombarely A., Posé D., Merchante C., et al. Gene expression atlas of fruit ripening and transcriptome assembly from RNA-Seq data in octoploid strawberry (*Fragaria × ananassa*). *Scientific Reports*. 2017;7:13737. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14239-6>
5. Xiao G., Zhang Q., Zeng X., Chen X., Liu S., Han Y. Deciphering the Molecular Signatures Associated With Resistance to *Botrytis cinerea* in Strawberry Flower by Comparative and Dynamic Transcriptome Analysis. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:888939. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.888939>
6. Lerocq M., Plesken C., Weber R. W. S., Kauff F., Scalliet G., Hahn M. Gray mold populations in German strawberry fields are resistant to multiple fungicides and dominated by a novel clade closely related to *Botrytis cinerea*. *Applied and Environmental Microbiology*. 2013;79(1):159–167. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.02655-12>
7. Vanti G. L., Leshem Y., Masaphy S. Resistance response enhancement and reduction of *Botrytis cinerea* infection in strawberry fruit by *Morchella conica* mycelial extract. *Postharvest Biology and Technology*. 2021;175:111470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111470>
8. Максимов И. В., Сингх Б. П., Черепанова Е. А., Бурханова Г. Ф., Хайруллин Р. М. Перспективы применения бактерий – продуцентов липопептидов для защиты растений (обзор). *Прикладная биохимия и микробиология*. 2020;56(1):19–34. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0555109920010134> EDN: AQQMZV
9. Холод Н. А., Маслиенко Л. В. Биологизированный контроль серой гнили земляники садовой в условиях усиления абиотического и антропогенного воздействий. *Научные труды Северо-Кавказского федерального научного центра садоводства, виноградарства, виноделия*. 2018;14:179–183. DOI: <https://doi.org/10.30679/2587-9847-2018-14-179-183> EDN: LBLPVZ

10. Petrasch S., Mesquida-Pesci S. D., Pincot D. D. A., Feldmann M. J., López C. M., Famula R., et al. Genomic prediction of strawberry resistance to postharvest fruit decay caused by the fungal pathogen *Botrytis cinerea*. G3: Genes. Genomes. Genetics. 2022;12(1):jkab378. DOI: <https://doi.org/10.1093/g3journal/jkab378>
11. Храбров И. Э., Антонова О. Ю., Шаповалов М. И., Семёнова Л. Г. Устойчивость земляники к основным грибным фитопатогенам: R-гены и их ДНК-маркеры. Биотехнология и селекция растений. 2019;2(3):30–40. DOI: <https://doi.org/10.30901/2658-6266-2019-3-o3> EDN: ZAKLPL
12. Лыжин А. С., Лукьянчук И. В. Молекулярный скрининг аллелей резистентности 08 TO-F, RCA2 и RPF1 в гибридном потомстве земляники садовой для идентификации форм с комплексной устойчивостью к грибным патогенам. Письма в Вавиловский журнал генетики и селекции. 2024;10(2):105–110. DOI: <https://doi.org/10.18699/letvjgb-2024-10-12> EDN: BHUUFJ
13. Hébert C., Charles M. T., Gauthier L., Willemot C., Khanizadeh S., Cousineau J. Strawberry Proanthocyanidins: biochemical markers for *Botrytis cinerea* resistance and shelf-life predictability. Acta Horticulturae. 2002;567:143. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.567.143>
14. Зубов А. А. Теоретические основы селекции земляники. Мичуринск, 2004. С. 45–121.
15. Кичина В. В. Генетика и селекция ягодных культур. М.: Колос, 1984. С. 223–250.

References

1. Shamanskaya L. D. Pests and diseases of Siberian gardens. Barnaul: *Novyy format*, 2018. pp. 133–134.
2. Petrasch S., Knapp S. J., van Kan J. A. L., Blanco-Ulate B. Grey mould of strawberry, a devastating disease caused by the ubiquitous necrotrophic fungal pathogen *Botrytis cinerea*. Molecular Plant Pathology. 2019;20(6):877–892. DOI: <https://doi.org/10.1111/mpp.12794>
3. Guo J., Wang S., XiaoYang Y., Dong R., Li Y., Mei X., Shen Y. Polyamines regulate strawberry fruit ripening by ABA, IAA, and ethylene. Plant Physiology. 2018;177(1):339–351. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.18.00245>
4. Sánchez-Sevilla J. F., Vallarino J. G., Osorio S., Bombarely A., Posé D., Merchante C., et al. Gene expression atlas of fruit ripening and transcriptome assembly from RNA-Seq data in octoploid strawberry (*Fragaria × ananassa*). Scientific Reports. 2017;7:13737. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14239-6>
5. Xiao G., Zhang Q., Zeng X., Chen X., Liu S., Han Y. Deciphering the Molecular Signatures Associated With Resistance to *Botrytis cinerea* in Strawberry Flower by Comparative and Dynamic Transcriptome Analysis. Frontiers in Plant Science. 2022;13:888939. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.888939>
6. Leroy M., Plesken C., Weber R. W. S., Kauff F., Scalliet G., Hahn M. Gray mold populations in German strawberry fields are resistant to multiple fungicides and dominated by a novel clade closely related to *Botrytis cinerea*. Applied and Environmental Microbiology. 2013;79(1):159–167. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.02655-12>
7. Vanti G. L., Leshem Y., Masaphy S. Resistance response enhancement and reduction of *Botrytis cinerea* infection in strawberry fruit by *Morchella conica* mycelial extract. Postharvest Biology and Technology. 2021;175:111470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111470>
8. Maksimov I. V., Singh B. P., Cherepanova E. A., Burkhanova G. F., Khayrullin R. M. Prospects and applications of lipopeptide-producing bacteria for plant protection (review). *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*. 2020;56(1):19–34. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0555109920010134>
9. Kholod N. A., Maslienko L. V. Biological control of strawberry gray rot under the conditions of increase in abiotic and anthropogenic factors. *Nauchnye trudy Severo-Kavkazskogo federal'nogo nauchnogo tsentra sadovodstva, vinogradstva, vinodeliya*. 2018;14:179–183. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30679/2587-9847-2018-14-179-183>
10. Petrasch S., Mesquida-Pesci S. D., Pincot D. D. A., Feldmann M. J., López C. M., Famula R., et al. Genomic prediction of strawberry resistance to postharvest fruit decay caused by the fungal pathogen *Botrytis cinerea*. G3: Genes. Genomes. Genetics. 2022;12(1):jkab378. DOI: <https://doi.org/10.1093/g3journal/jkab378>
11. Khrabrov I. E., Antonova O. Yu., Shapovalov M. I., Semenova L. G. Strawberry resistance to the major fungal phytopathogens: R-genes and their DNA markers. *Biotehnologiya i selektsiya rasteniy* = Plant Biotechnology and Breeding. 2019;2(3):30–40. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30901/2658-6266-2019-3-o3>
12. Lyzhin A. S., Luk'yanchuk I. V. Molecular screening of resistance alleles 08 TO-F, RCA2 and RPF1 in strawberry hybrid progeny for identify forms with complex resistance to fungal pathogens. *Pis'ma v Vavilovskiy zhurnal genetiki i selektsii* = Letters to the Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2024;10(2):105–110. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18699/letvjgb-2024-10-12>
13. Hébert C., Charles M. T., Gauthier L., Willemot C., Khanizadeh S., Cousineau J. Strawberry Proanthocyanidins: biochemical markers for *Botrytis cinerea* resistance and shelf-life predictability. Acta Horticulturae. 2002;567:143. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.567.143>
14. Zubov A. A. Theoretical foundations of strawberry breeding. Michurinsk, 2004. pp. 45–121.
15. Kichina V. V. Genetics and breeding of berry crops. Moscow: *Kolos*, 1984. pp. 223–250.

Сведения об авторе

✉ **Невоструева Елена Юрьевна**, кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», ул. Белинского, 112а, г. Екатеринбург, Российская Федерация, 620142, e-mail: sadovodnauka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5077-1258>

Information about the author

✉ **Elena Yu. Nevostueva**, PhD in Agricultural Science, senior researcher, Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Science, 112, bldg. A, Belinskogo Street, Yekaterinburg, Russian Federation, 620142, e-mail: sadovodnauka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5077-1258>

✉ – Для контактов / Corresponding author

ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ/PLANT PROTECTION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.98-106>
УДК 632.25:632.4.01/.08



Распространение фузариозной сухой гнили клубней картофеля в Российской Федерации

© 2025. Т. Ю. Гагкаева , А. С. Орина, О. П. Гаврилова, И. И. Трубин, А. В. Хютти

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

Фузариозная сухая гниль клубней (ФСГК), вызываемая грибами рода *Fusarium*, повсеместное заболевание картофеля, приводящее к снижению качества семян как при посадке, так и в процессе хранения. Цель исследования – установить распространение ФСГК в РФ и оценить видовое разнообразие грибов, вызывающих это заболевание. В период 2018–2024 гг. был проведен клубневой анализ 342 партий картофеля, полученных из различных регионов 5 федеральных округов (ФО) РФ. Оценивали долю партий картофеля с ФСГК и встречаемость клубней с симптомами заболевания, а также проводили выделение грибов *Fusarium* из этих клубней с последующей идентификацией по сумме морфолого-культуральных признаков. Установлено, что 82,7 % анализированных партий картофеля содержали клубни с симптомами поражения ФСГК – в среднем от 5,7 до 13,5 %. Урожай клубней 2020, 2021, 2023 и 2024 гг. можно охарактеризовать как относительно слабо зараженный ФСГК – встречаемость клубней с симптомами не превышала в среднем 6,5 %, тогда как в 2018 и 2019 гг. отмечена значительная зараженность урожая – 15,3–20,5 % клубней. Согласно результатам дисперсионного анализа, установлено достоверное влияние факторов «происхождение», «год», «сорт» и «репродукция» на проявление ФСГК в партиях картофеля. Идентификация изолятов *Fusarium*, выделенных из клубней, выявила представителей семи комплексов видов: *F. sambucinum* (FSAM), *F. oxysporum* (FO), *F. tricinctum*, *F. incarnatum-equiseti*, *F. redolens* (FR), *F. solani* и *F. nisikadoi*. В Сибирском, Центральном и Северо-Западном ФО из клубней с симптомами ФСГК чаще выделялись представители комплекса видов FSAM (34,2–66,7 % от всех выделенных грибов *Fusarium*, среди которых доминировал *F. sambucinum*). Отмечено преобладание представителей комплекса видов FO в Северо-Кавказском ФО – 68,8 %. В Приволжском ФО с высокой частотой (33,3 %) выявлен грибок *F. redolens* из комплекса видов FR. Понимание, какие именно потенциальные факторы влияют на распространение ФСГК и видовой состав доминирующих патогенов позволит обосновать мероприятия по защите картофеля от заболевания.

Ключевые слова: *Solanum tuberosum* L., виды *Fusarium*, мониторинг, репродукция, сорт, федеральный округ РФ

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (№ проекта 23-26-00105) <https://rscf.ru/project/23-26-00105/>

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Гагкаева Т. Ю., Орина А. С., Гаврилова О. П., Трубин И. И., Хютти А. В. Распространение фузариозной сухой гнили клубней картофеля в Российской Федерации. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(1):98–106. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.98-106>

Поступила: 01.11.2024

Принята к публикации: 17.01.2025

Опубликована онлайн: 26.02.2025

Distribution of *Fusarium* dry rot of potato tubers in Russian Federation

© 2025. Tatiana Yu. Gagkaeva , Aleksandra S. Orina, Olga P. Gavrilova, Ilya I. Trubin, Aleksandr V. Khiutti

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

Fusarium dry rot of tubers (FDR), caused by *Fusarium* fungi, is a widespread potato disease that reduces seed quality both during planting and storage. The aim of the study was to establish the distribution of FDR in Russia and to reveal the species diversity of fungi causing this disease. In 2018–2024, tuber analysis of 342 potato batches obtained from various regions of 5 Federal Districts of the Russia was carried out. The share of batches with FDR and the occurrence of the tubers with disease symptoms were assessed, and *Fusarium* fungi were isolated from these tubers, followed by identification of them based on the morphological and cultural characteristics. It was found that 82.7 % of the analyzed potato batches contained tubers infected with *Fusarium* fungi, the proportion of which varied from 5.7 to 13.5 %. Potato yield of 2020, 2021, 2023 and 2024 can be characterized as a relatively low-infected by FDR, the frequency occurrence of tubers with disease symptoms did not exceed 6.5 % on average, whereas in 2018 and 2019, high potato infestation was noted – 15.3–20.5 % of tubers. According to the results of the dispersion analysis, a reliable effect of the factors “origin”, “year”, “cultivar” and “reproduction” on the FSGC occurrence

in potato batches was established. *Fusarium* fungi isolated from tubers were represented by members of seven species complexes: *F. sambucinum* (FSAMSC), *F. oxysporum* (FOSC), *F. tricinctum*, *F. incarnatum-equiseti*, *F. redolens* (FRSC), *F. solani* and *F. nisikadoi*. In the Siberian, Central and Northwestern Federal Districts, FSAMSC isolates were the most common in the tuber with FDR symptoms (34.2–66.7 % of all isolated *Fusarium* fungi), and *F. sambucinum* dominated among them. In the North Caucasian Federal District, FOSC isolates prevailed – 68.8 % of all isolated *Fusarium* fungi. In the Volga Federal District, the *F. redolens* from the FRSC was detected with a high frequency (33.3 %). Understanding the key factors facilitating on FDR and the species composition of pathogens will make it possible to justify the control of this potato disease.

Keywords: *Solanum tuberosum* L., *Fusarium* species, monitoring, reproduction, cultivar, Federal District of Russian Federation

Acknowledgments: the study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-26-00105) <https://rscf.ru/project/23-26-00105/>

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

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

For citations: Gagkaeva T. Yu., Orina A. S., Gavrilova O. P., Trubin I. I., Khiutti A. V. Distribution of *Fusarium* dry rot of potato tubers in Russian Federation. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):98–106. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.98-106>

Received: 01.11.2024

Accepted for publication: 17.01.2025

Published online: 26.02.2025

Картофель (*Solanum tuberosum* L.) является важной продовольственной культурой, общий мировой объем производства этой сельскохозяйственной продукции превышает 300 млн т¹. Российская Федерация является одним из крупнейших производителей картофеля в мире: посевные площади этой культуры в 2023 году составили 1075 тыс. га, а производство картофеля – 20,2 млн т^{2, 3}. Наибольшие площади посадок и объемы валового сбора урожая зафиксированы в Центральном, Приволжском и Сибирском федеральных округах (ФО) – 33,6 % (6,9 млн т), 24,4 % (5,0 млн т) и 12,1 % (2,5 млн т) соответственно.

Известно более 3000 сортов картофеля, из которых 535 зарегистрированы в «Государственном реестре селекционных достижений, допущенных к использованию»⁴. Сорта различаются периодом созревания, цветом кожуры и содержанием крахмала, а также устойчивостью к вредным организмам. Такое разнообразие позволяет выбирать наиболее подходящие сорта для выращивания в определенной местности и по целевому назначению.

Основное отличие картофеля от многих других сельскохозяйственных культур – вегетативное размножение клубнями. Репродукция является важной характеристикой партии сортового картофеля. Начиная с первого года получения сева из семян или от меристемного

растения до получения третьей репродукции, проходит 8 лет культивирования. При посадке семян каждой следующей репродукции, как правило, происходит постепенное накопление в клубнях возбудителей различных заболеваний.

Одним из самых вредоносных заболеваний картофеля является фузариозная сухая гниль клубней (ФСГК), вызываемая грибами рода *Fusarium*, которое широко распространено во всем мире и приводит к потерям урожая в период хранения от 30 до 50 %, а также к снижению качества клубней [1]. С сухой гнилью картофеля ассоциировано около 11–13 видов фузариевых грибов, но их состав варьирует в зависимости от условий выращивания [2, 3, 4].

Несомненная целесообразность применения патоген-ориентированных подходов в современных технологиях возделывания культурных растений актуализирует ценность знаний о точном видовом составе возбудителей ФСГК и последующего изучения их свойств. Данная информация позволит расширить возможности получения здорового семенного и продовольственного картофеля с помощью оптимизации методов ограничения заболевания.

Цель исследования – установить распространение ФСГК в пяти картофелепроизводящих федеральных округах РФ в течение 2018–2024 гг. и оценить видовое разнообразие грибов *Fusarium*, вызывающих это заболевание.

¹Potato Facts and Figures. CIP International Potato Center [Электронный ресурс].

URL: <https://cipotato.org/potato/potato-facts-and-figures> (дата обращения: 31.10.2024).

²Федеральная служба государственной статистики. Посевные площади Российской Федерации в 2023 году.

[Электронный ресурс]. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/posev_2023.xlsx (дата обращения: 31.10.2024).

³Федеральная служба государственной статистики. Валовые сборы и урожайность сельскохозяйственных культур по Российской Федерации в 2023 году. Часть 2. [Электронный ресурс].

URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Val-2_2023.xlsx (дата обращения: 31.10.2024).

⁴Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Том 1. Сорта растений.

[Электронный ресурс]. URL: <https://gossortrf.ru/registry> (дата обращения: 31.10.2024).

Научная новизна – сравнительный анализ влияния условий культивирования на распространение ФСГК и разнообразие патогенов, ассоциированных с данным вредоносным заболеванием, на территории РФ ранее не проводился.

Материал и методы. В течение 7 лет провели клубневой анализ 342 партий семенного картофеля из различных регионов пяти ФО РФ. Партии картофеля представляли собой однородную продукцию клубней определенного сорта, изготовленную производителем в одинаковых условиях, оформленную одним сопроводительным документом и доставленную одновременно. Согласно методам^{5, 6}, из каждой партии отбирали среднюю пробу (200 клубней) и оценивали наличие клубней с внешними и внутренними признаками поражения ФСГК. Всего проанализировано в 2018 г. – 39 проб, 2019 – 36, 2020 – 65, 2021 – 57, 2022 – 42, 2023 – 66, 2024 – 37 проб. Учитывали распространённость заболевания – доля (%) партий картофеля из определенного ФО, в которых выявлены клубни с визуально заметными симптомами сухой гнили, а также встречаемость – доля (%) клубней с симптомами ФСГК (среднее, медиана, диапазон). Анализируемые партии картофеля были представлены 81 сортом.

Пораженную ткань клубней картофеля раскладывали на картофельно-сахарозную агаризованную питательную среду (КСА) с добавлением 0,4 мкл/л смеси антибиотиков, состоящей из ампициллина, стрептомицина, пенициллина (HyClone, Австрия) и 0,4 мкл/л 10%-го раствора Triton X-100 (Panreac, Испания). Чашки Петри инкубировали при 23 °C в темноте. Из каждой культуры гриба, выросшего из ткани клубня и первоначально отнесенного к роду *Fusarium*, получали моноспоровый изолят. Для этого готовили суспензию спор гриба, которую распределяли шпателем по поверхности КСА, содержащей Triton X-100, и в дальнейшем отсеивали отдельно выросший изолят, который использовали для последующих исследований [5]. Идентификацию грибов проводили по сумме морфолого-культуральных признаков [6, 7] в соответствии с современными представлениями о таксономии грибов рода *Fusarium* [8]. Все анализируемые моноспоровые изоляты хранятся в коллекции чистых культур грибов лаборатории микологии и фитопатологии ФГБНУ ВИЗР. Полученные данные анализи-

ровали в программах Microsoft Excel 2010 и STATISTICA 12. С помощью критериев Колмогорова и Шапиро-Уилка выявили, что характер распределения данных отличается от нормального, поэтому результаты для каждой из выборок, сформированных на основании происхождения, сорта и года урожая анализируемых партий, представлены в виде средней и медианы. Оценку статистической значимости выявленных различий между группами проводили с помощью непараметрического критерия Краскела-Уоллиса и считали их достоверными при $p < 0,05$. Влияние факторов на долю клубней с симптомами ФСГК оценивали с помощью дисперсионного анализа, используя логарифмическое преобразование данных.

Результаты и их обсуждение. Клубни картофеля с симптомами гнилей, вызванных грибами рода *Fusarium*, встречались в партиях картофеля из всех анализируемых ФО РФ: доля партий с ФСГК варьировала от 77 % в Северо-Западном до 96 % в Северо-Кавказском ФО (табл. 1).

При анализе картофеля из Приволжского ФО выявлены партии, в которых доля клубней с симптомами поражения ФСГК достигала 100 % (сорт Гала, 2019 г.). Достоверные различия по встречаемости заболевания в анализируемых макрорегионах за годы исследований установлены между партиями из Северо-Западного ФО (5,7 %), где зараженность клубней грибами была самой низкой, и партиями из Центрального (9,3 %, $p = 0,026$), и Приволжского ФО (13,5 %, $p < 0,0001$).

Урожай клубней в 2020, 2021, 2023 и 2024 гг. во всех анализируемых ФО можно охарактеризовать как относительно слабо пораженный ФСГК – доля клубней с симптомами заболевания не превышала в среднем 6,5 %, тогда как в 2018 и 2019 гг. отмечена высокая встречаемость заболевания – 15,3–20,5 %.

Среди анализируемых сортов наиболее часто встречающимися являлись Гала и Ред Скарлетт – их доля составила 17,0 и 10,2 % от всех рассмотренных партий. Другие сорта встречались реже: Коломба и Ривьера составляли около 5 % партий каждый; Арроу, Вега, Инноватор, Королева Анна, Ред Леди и Эволюшн – от 2 до 4 %. Остальные сорта были представлены единичными партиями.

⁵ГОСТ 33996-2016. Межгосударственный стандарт. Картофель семенной. Технические условия и методы определения качества. М.: Стандартинформ, 2017. 35 с. URL: <https://fsvps.gov.ru/files/gost-33996-2016-mezhgosudarstvennyj-standart/>

⁶ГОСТ Р 59551-2021. Национальный стандарт Российской Федерации. Картофель семенной. Отбор проб и методы диагностики фитопатогенов. М.: Стандартинформ, 2021. 23 с. URL: <https://npalib.ru/2021/06/03/gost-r-59551-2021-id172151/>

Таблица 1 – Степень поражения картофеля фузариозной сухой гнилью клубней (ФСГК) по федеральным округам РФ (2018–2024 гг.) /

Table 1 – Degree of Fusarium dry rot (FDR) infestation of potato from different Federal districts of Russia (2018–2024)

Федеральный округ РФ (годы исследований) / Federal district of Russian Federation (years of research)	Число партий / Number of batches	Доля партий с ФСГК, % / Share of batches with FDR, %	Доля клубней с симптомами ФСГК в партии, %* / Share of tubers with FDR symptoms, %		
			среднее** / average	медиана / median	диапазон / range
Приволжский / Volga (2018–2024)	72	83	13,5 ^b	8,0	0–100
Северо-Западный / Northwestern (2018–2024)	179	77	5,7 ^a	3,0	3–94
Северо-Кавказский / North Caucasian (2018–2024)	26	96	10,6 ^{ab}	5,3	0–57
Сибирский / Siberian (2020–2023)	20	95	9,7 ^{ab}	3,8	0–45
Центральный / Central (2018–2024)	45	91	9,3 ^b	5,6	0–46

*В каждой партии анализировали среднюю пробу (n = 200); **Средние величины, достоверно различающиеся по непараметрическому критерию Краскела-Уоллиса, обозначены разными надстрочными латинскими буквами /

*The average sample (n = 200) was analyzed in each batch; **The average values, which differ significantly according to the nonparametric Kruskal-Wallis criterion, are indicated by different superscript Latin letters

При сравнении сортов картофеля, представленных в анализируемой выборке более чем 10 партиями (Гала, Ред Скарлетт, Ривьера, Коломба и Ред Леди), по встречаемости ФСГК достоверные различия ($p = 0,015$) выявлены только между наиболее пораженным сортом Коломба (доля инфицированных партий составляла 95,2 %; средняя/медианная зараженность клубней 13,2/11,0 %) и менее пораженным Ред Леди (69,2 %; 3,1/2,0 %).

По мнению многих исследователей, нет ни одного коммерческого сорта с высокой устойчивостью к ФСГК, но восприимчивость сортов

к этому заболеванию существенно варьирует [9, 10, 11]. Также показано, что восприимчивость сорта может различаться в зависимости от вида *Fusarium*, доминирующего в комплексе возбудителей ФСГК [10, 12, 13].

Репродукция большинства анализируемых партий картофеля (41,2 %) относилась к элите (табл. 2). Достоверные различия по доле пораженных клубней ФСГК в партиях установлены между первой полевой репродукцией и элитой ($p = 0,014$), а также между первой и второй репродукцией ($p = 0,036$).

Таблица 2 – Поражение картофеля фузариозной сухой гнилью клубней (ФСГК) в зависимости от репродукции семян (2018–2024 гг.) /

Table 2 – Fusarium dry rot (FDR) infestation of potato in dependence of seed reproduction (2018–2024)

Репродукция / Reproduction	Число партий / Number of batches	Доля партий с ФСГК, % / Share of batches with FDR, %	Доля клубней с симптомами ФСГК, %* / Share of tubers with FDR symptoms, %		
			среднее** / average	медиана / median	диапазон / range
Первая полевая репродукция / The first field reproduction	13	62	1,6 ^a	1,0	0–6
Супер-суперэлита / Super-superelite	46	83	8,1 ^{ab}	4,2	0–57
Суперэлита / Superelite	62	77	5,0 ^{ab}	3,0	0–32
Элита / Elite	141	86	10,3 ^b	5,0	0–100
Первая репродукция / The first reproduction	32	84	8,8 ^{ab}	3,7	0–62
Вторая репродукция / The second reproduction	48	85	9,0 ^b	5,4	0–45

*В каждой партии анализировали среднюю пробу (n = 200); **Средние величины, достоверно различающиеся по непараметрическому критерию Краскела-Уоллиса, обозначены разными надстрочными латинскими буквами /

*The average sample was analyzed in each batch (n = 200); **The average values, which significantly differ according to the nonparametric Kruskal-Wallis criterion, are indicated by different Latin superscript letters

Признаки заболевания были выявлены в более чем 62 % партий картофеля первой полевой репродукции с медианной заражённостью 1 %, доля поражённых клубней возрас- тала и в последующих репродукциях. Вероятно, значительное распространение ФСГК в клубнях ранней репродукции обусловлено инфициро- ванностью почвы, где грибы-возбудители могут сохраняться в виде хламидоспор и мицелия в течение длительного времени. После сбора урожая заражённая почва может оставаться на поверхности клубней, способствуя переносу инфекции в хранилища, где развитие заболе- вания продолжается. В дальнейшем высадка заражённых семян обеспечивает новый и допол- нительный источник инфекции в почве. Таким образом, патогены могут накапливаться с тече- нием времени на полях, где возделывают

картофель, и распространяться с семенами на новые территории [9, 14].

Согласно результатам дисперсионного анализа, установлено достоверное влияние всех учтённых факторов – «происхождение» ($p < 0,001$), «год» ($p < 0,001$), «сорт» ($p < 0,001$) и «репродукция» ($p = 0,01$) – на проявление ФСГК в партиях картофеля. Также выявлено значи- тельное взаимодействие факторов «происхож- дение» и «год», влияющих на встречаемость заболевания ($p < 0,001$).

Идентификация по сумме морфолого- культуральных признаков изолятов *Fusarium*, выделенных из клубней, выявила представителей семи комплексов видов фузариевых грибов – *F. sambucinum* (FSAM), *F. oxysporum* (FO), *F. tricinctum* (FT), *F. incarnatum-equiseti* (FIE), *F. redolens* (FR), *F. solani* (FS) и *F. nisikadoi* (FN) (табл. 3).

Таблица 3 – Разнообразие грибов рода *Fusarium*, выделенных из клубней картофеля с симптомами сухой гнили из различных ФО РФ /

Table 3 – Diversity of *Fusarium* fungi isolated from potato tubers with dry rot symptoms from different Federal Districts of Russia

Федеральный округ РФ / Federal district of Russian Federation	Число изолятов / Number of isolates	Представленность изолятов, относящихся к комплексам видов фузариевых грибов*, % / The proportion of isolates belonging to different <i>Fusarium</i> species complexes*, %						
		FSAM	FO	FT	FIE	FR	FS	FN
Приволжский / Volga	12	16,7	16,7	8,3	16,7	33,3	8,3	0
Северо-Западный / Northwestern	38	34,2	10,5	28,9	13,2	5,3	5,3	2,6
Северо-Кавказский / North Caucasian	16	6,3	68,8	12,3	0	6,3	6,3	0
Сибирский / Siberian	9	66,7	22,2	0	11,1	0	0	0
Центральный / Central	35	57,1	20,0	11,5	5,7	0	5,7	0
Всего	110	38,2	23,6	16,4	9,1	6,4	5,4	0,9

*Комплексы видов / Species complexes: *Fusarium sambucinum* (FSAM), *F. oxysporum* (FO), *F. tricinctum* (FT), *F. incarnatum-equiseti* (FIE), *F. redolens* (FR), *F. solani* (FS), *F. nisikadoi* (FN).

Чаще остальных видов из клубней карто- феля с симптомами сухой гнили, выращенного в Сибирском, Центральном и Северо-Западном ФО, были выделены представители комплекса видов FSAM, среди которых доминировал *F. sambucinum*. Этот гриб характеризуется высокой агрессивностью и является одним из самых распространенных и вредоносных пато- генов клубней картофеля во многих странах [15, 16, 17]. Другие представители комплекса FSAM – *F. sporotrichioides* и *F. graminearum* – выявлены в исследуемом материале из Централь- ного ФО, и только один изолят *F. venenatum* идентифицирован среди грибов, выделенных из клубней картофеля, выращенного в Северо- Западном ФО.

Представители комплекса видов FO встречались во всех регионах, но их значи- тельное доминирование (68,8 %) отмечено в Северо-Кавказском ФО, что предполагает их адаптированность к данным условиям обита- ния, включая устойчивость к воздействию фак- торов абиотического и биологического харак- тера. Структура комплекса видов FO долгое время находилась в «таксономическом хаосе» из-за большого количества криптических видов, возникших из-за использования изменчивых внутривидовых морфологических характе- ристик, а также отсутствия живого типового материала, на котором можно было бы осно- вывать фундаментальные филогенетические анализы грибов данного комплекса [18]. В 2019 г.

исследователи определили эпитип для *F. oxysporum* s. str., используя штаммы, выделенные из клубней картофеля с симптомами сухой гнили в Германии, что также привело к описанию 15 новых видов комплекса FO [18]. Морфолого-культуральные признаки видов FO имеют расплывчатые границы, что значительно усложняет их идентификацию. Мы предполагаем присутствие не менее пяти разных видов FO среди выделенных из клубней изолятов в нашем исследовании, однако установить их точную видовую принадлежность будет возможно лишь с помощью молекулярно-генетических методов. Кроме того, разнообразие видов комплекса FO требует дальнейшего тщательного изучения их свойств для понимания распространения этих грибов, круга растений-хозяев, вредоносности, чувствительности к фунгицидам.

Представители комплекса видов FT выявлены повсеместно, за исключением Сибирского ФО. Максимальная встречаемость изолятов этого комплекса видов среди всего разнообразия выделенных грибов *Fusarium* отмечена в Северо-Западном ФО (28,9 %) с превалированием вида *F. avenaceum*, который является типичным патогеном зерновых культур, возделываемых в данном регионе [19]. Кроме него, единично отмечены *F. acuminatum*, *F. flocciferum*, *F. torulosum* и *F. tricinctum*.

Из представителей FIE *F. equiseti* выявлен во всех анализированных ФО, кроме Северо-Кавказского, с частотой встречаемости 5,7–16,7 %. Гриб *F. redolens* из одноименного комплекса видов FR с высокой частотой (33,3 %) выявлен в Приволжском ФО, и единично изоляты этого вида встречались в Северо-Западном и Северо-Кавказском ФО. Ранее *F. redolens* был выделен из клубней картофеля, выращенного в Татарстане [20] и Красноярском крае [21].

Встречаемость грибов комплекса видов FS являлась относительно низкой по сравнению с представителями других комплексов видов – 5,3–8,3 %, кроме Сибирского ФО, где эти грибы не обнаружены. С использованием филогенетического анализа установлено, что изолированные грибы представлены видами *F. mori*, *F. noneumartii*, *F. stercicola* и *F. vanettenii* [17].

Один изолят *F. commune*, относящийся к комплексу видов FN, выявлен в Северо-Западном ФО. Ранее этот вид уже выделяли из клубней картофеля в Европейской части России [4].

Патогены, зимующие на хранящемся семенном картофеле, являются одним из факторов, влияющих на дальнейшее распространение заболевания. У штаммов отдельных видов грибов *Fusarium* отмечено значительное внутривидовое разнообразие по агрессивности и другим свойствам [3, 9]. Наши исследования штаммов *F. sambucinum*, а также грибов видов комплекса FS, выделенных из картофеля, показали значительные видовые и внутривидовые различия по агрессивности к клубням [15, 17, 22] и чувствительности к фунгицидам [23].

Видовые особенности и агрессивность гриба могут существенно влиять на глубину проникновения инфекции в ткани клубня и на промежуток времени, в течение которого картофель может храниться без потерь урожая. Повреждения перидермы клубней, которые возникают во время механизированных операций, а также раны от насекомых и грызунов способствуют заселению тканей картофеля микроорганизмами [9, 13, 14]. Поскольку в тканях гниющего картофеля вслед за агрессивным этиологическим агентом (патогенный микромицет или бактерия), а также в механически поврежденных клубнях могут поселяться и успешно развиваться сапротрофные и некротрофные организмы, поэтому частая встречаемость определенного гриба не всегда обусловлена его патогенностью. При первичном анализе пораженной ткани клубней на питательной агаризованной среде мы часто отмечали присутствие других микроорганизмов совместно с грибами *Fusarium*.

Полученные результаты могут служить отправной точкой для будущих исследований, включающих мониторинг ФСГК в различных регионах, оценку разнообразия комплекса возбудителей и его изменения под влиянием условий окружающей среды, что станет основой усовершенствованных стратегий возделывания картофеля.

Заключение. Фузариозная сухая гниль клубней (ФСГК), вызываемая грибами *Fusarium*, является распространенным заболеванием картофеля, приводящим к снижению качества семян как при посадке, так и в процессе хранения. При проведении клубневого анализа 342 партий картофеля, выращенного в пяти ФО РФ, выявлено, что 82,7 % из них содержали клубни с симптомами поражения грибами *Fusarium*.

В семенных партиях допускается содержание клубней с признаками ФСГК не более 1 %⁷ и, согласно результатам проведённого исследования, только у 26,0 % партий этот показатель соответствовал норме. Установлено, что с увеличением репродукции картофеля возрастает доля партий клубней с ФСГК, и даже в партиях первой полевой репродукции встречаемость таких клубней может достигать 6 %, что вероятнее всего обусловлено патогенами, сохраняющимися в почве. Микологический анализ пораженных тканей клубней позволил идентифицировать различные виды

Fusarium, относящихся к 7 комплексам видов, из которых FSAM и FO встречались в партиях картофеля из всех макрорегионов. Наибольшее разнообразие идентифицированных видов фузариевых грибов выявлено в Северо-Западном ФО, наименьшее – в Сибирском ФО. Установление ключевых факторов, определяющих распространение ФСГК и доминирующий состав патогенов, а также характеристика их свойств позволят оптимизировать систему защитных мероприятий, приводящую к получению высококачественного урожая картофеля.

Список литературы

1. Kerkeni A., Daami-Remadi M., Khedher M. B. *In vivo* evaluation of compost extracts for the control of the potato *Fusarium* wilt caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *tuberosi*. The African Journal of Plant Science and Biotechnology. 2013;7(1):36–41. URL: https://www.researchgate.net/publication/311970290_In_vivo_Evaluation_of_compost_extract_for_the_control_of_the_potato_Fusarium_wilt_caused_by_Fusarium_oxysporum_f_sp_tuberosi
2. Tiwari R. K., Kumar R., Sharma S., Sagar V., Aggarwal R., Naga K. C., et al. Potato dry rot disease: current status, pathogenomics and management. 3 Biotech. 2020;10(11):503. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02496-8>
3. Azil N., Stefańczyk E., Sobkowiak S., Chihat S., Boureghda H., Śliwka J. Identification and pathogenicity of *Fusarium* spp. associated with tuber dry rot and wilt of potato in Algeria. European Journal of Plant Pathology. 2021;159:495–509. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10658-020-02177-5>
4. Белосохов А. Ф., Ярмеева М. М., Долгов А. М., Миславский С. М., Албантов Г. П., Курчаев М. Л., и др. Грибы рода *Fusarium* на клубнях картофеля. Современная микология в России. 2022;9:250–252. Режим доступа: <https://istina.msu.ru/publications/article/504031416/>
5. Гагкаева Т. Ю., Гаврилова О. П., Левитин М. М., Новожилов К. В. Фузариоз зерновых культур. Защита и карантин растений. 2011;(S5):69–120.
6. Gerlach W., Nirenberg H. The genus *Fusarium* - a pictorial atlas. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt Für Land- und Forstwirtschaft, Berlin – Dahlem. 1982;209:1–405. URL: <https://eurekamag.com/research/001/138/001138278.php>
7. Nirenberg H. I. Morphological differentiation of *Fusarium sambucinum* Fuckel sensu stricto, *F. torulosum* (Berk. & Curt.) Nirenberg comb. nov. and *F. venenatum* Nirenberg sp. nov. Mycopathologia. 1995;129:131–141. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01103337>
8. Geiser D. M., Al-Hatmi A. M. S., Aoki T., Arie T., Balmas V., Barnes I., et al. Phylogenomic analysis of a 55.1 kb 19-gene dataset resolves a monophyletic *Fusarium* that includes the *Fusarium solani* species complex. Phytopathologia. 2021;111(7):1064–1079. DOI: <https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-20-0330-LE>
9. Peters J. C., Lees A. K., Cullen D. W., Sullivan L., Stroud G. P., Cunningham A. C. Characterization of *Fusarium* spp. responsible for causing dry rot of potato in Great Britain. Plant Pathology. 2008;57(2):262–271. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2007.01777.x>
10. Bojanowski A., Avis T. J., Pelletier S., Tweddell R. J. Management of potato dry rot. Postharvest Biology and Technology. 2013;84:99–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.04.008>
11. Stefańczyk E., Sobkowiak S., Brylińska M., Śliwka J. Diversity of *Fusarium* spp. associated with dry rot of potato tubers in Poland. European Journal of Plant Pathology. 2016;145:871–884. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10658-016-0875-0>
12. Du M., Ren X., Sun Q., Wang Y., Zhang R. Characterization of *Fusarium* spp. causing potato dry rot in China and susceptibility evaluation of Chinese potato germplasm to the pathogen. Potato Research. 2012;55:175–184. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11540-012-9217-6>
13. Gachango E., Hanson L. E., Rojas A., Hao J. J., Kirk W. W. *Fusarium* spp. causing dry rot of seed potato tubers in Michigan and their sensitivity to fungicides. Plant Disease. 2012;96(12):1767–1774. DOI: <https://doi.org/10.1094/PDIS-11-11-0932-RE>
14. Secor G. A., Salas B. *Fusarium* dry rot and *Fusarium* wilt. In: Stevenson W. R., Loria R., Franc G., Weingartner D. P. (Eds.). Compendium of potato diseases. St. Paul: APS Press, 2001. pp. 23–25.
15. Daami-Remadi M., Jabnoum-Khiareddine H., Ayed F., El Mahdjoub M. Effect of temperature on aggressivity of Tunisian *Fusarium* species causing potato (*Solanum tuberosum* L.) tuber dry rot. biocontrol. Journal of Agronomy. 2006;5(2):350–355. DOI: <https://doi.org/10.3923/ja.2006.350.355>
16. Estrada Jr. R., Gudmestad N. C., Rivera V. V., Secor G. A. *Fusarium graminearum* as a dry rot pathogen of potato in the USA: Prevalence, comparison of host isolate aggressiveness and factors affecting aetiology. Plant Pathology. 2010; 59(6):1114–1120. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02343.x>

⁷Руководство ЕЭК ООН по болезням, вредителям и дефектам семенного картофеля. Дата введения 2014-07-01. [Электронный ресурс]. URL: <https://unece.org/ru/trade/publications/rukovodstvo-eeek-oon-po-boleznyam-vreditelyam-i-defektam-semennogo-kartofelya> (дата обращения: 09.01.2025).

17. Gavrilo O., Orina A., Trubin I., Gagkaeva T. Identification and pathogenicity of *Fusarium* fungi associated with dry rot of potato tubers. *Microorganisms*. 2024;12(3):598. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms12030598>
18. Lombard L., Sandoval-Denis M., Lamprecht S. C., Crous P. W. Epitypification of *Fusarium oxysporum* – clearing the taxonomic chaos. *Persoonia*. 2019;43:1–47. DOI: <https://doi.org/10.3767/persoonia.2019.43.01>
19. Гаврилова О. П., Ганнибал Ф. Б., Гагкаева Т. Ю. Зараженность грибами *Fusarium* и *Alternaria* зерна овса на Северо-западе России. *Сельскохозяйственная биология*. 2016;51(1):111–118. DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.1.111rus> EDN: VPWCMH
20. Хадиева Г. Ф., Лутфуллин М. Т., Акосах Й. А., Малова А. В., Мочалова Н. К., Вологин С. Г., и др. Анализ микромитозов рода *Fusarium*, изолированных из инфицированных клубней картофеля, выращенных в Республике Татарстан. *Достижения науки и техники АПК*. 2018;32(3):34–39. DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-10307> EDN: YWENZR
21. Прудникова С. В., Чураков А. А., Овсянкина С. В., Хижняк С. В. Выделение и идентификация автохтонных возбудителей болезней картофеля, распространенных в регионах Сибири. *Биотехнология новых материалов – окружающая среда – качество жизни: мат-лы IV Международ. научн. конф.* Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2021. С. 174–177. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46578152> EDN: DLSUMC
22. Гагкаева Т. Ю., Орина А. С., Трубин И. И., Гаврилова О. П., Хютти А. В. *Fusarium sambucinum* – возбудитель сухой гнили клубней картофеля. *Вестник защиты растений*. 2023;106(3):137–145. DOI: <https://doi.org/10.31993/2308-6459-2023-106-3-16041> EDN: AXVWQ
23. Орина А. С., Гаврилова О. П., Трубин И. И., Гагкаева Т. Ю. Действие фунгицидов на возбудителей фузариозной сухой гнили картофеля. *Агрохимия*. 2024;3:37–42. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188124030057> EDN: DNVIKE

References

1. Kerkeni A., Daami-Remadi M., Khedher M. B. *In vivo* evaluation of compost extracts for the control of the potato *Fusarium* wilt caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *tuberosi*. *The African Journal of Plant Science and Biotechnology*. 2013;7(1):36–41. URL: https://www.researchgate.net/publication/311970290_In_vivo_Evaluation_of_compost_extracts_for_the_control_of_the_potato_Fusarium_wilt_caused_by_Fusarium_oxysporum_f_sp_tuberosi
2. Tiwari R. K., Kumar R., Sharma S., Sagar V., Aggarwal R., Naga K. C., et al. Potato dry rot disease: current status, pathogenomics and management. *3 Biotech*. 2020;10(11):503. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02496-8>
3. Azil N., Stefańczyk E., Sobkowiak S., Chihat S., Bouregghda H., Śliwka J. Identification and pathogenicity of *Fusarium* spp. associated with tuber dry rot and wilt of potato in Algeria. *European Journal of Plant Pathology*. 2021;159:495–509. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10658-020-02177-5>
4. Belosokhov A. F., Yarmeeva M. M., Dolgov A. M., Mislavskiy S. M., Albantov G. P., Kurchaev M. L., et al. *Fusarium* fungi on potato tubers. *Sovremennaya mikologiya v Rossii* = Current Mycology in Russia. 2022;9:250–252. (In Russ.). URL: <https://istina.msu.ru/publications/article/504031416/>
5. Gagkaeva T. Yu., Gavrilo O. P., Levitin M. M., Novozhilov K. V. *Fusarium* wilt disease of grain crops. *Zashchita i karantin rasteniy*. 2011;(S5):69–120. (In Russ.).
6. Gerlach W., Nirenberg H. The genus *Fusarium* - a pictorial atlas. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt Für Land- und Forstwirtschaft, Berlin – Dahlem*. 1982;209:1–405. URL: <https://eurekamag.com/research/001/138/001138278.php>
7. Nirenberg H. I. Morphological differentiation of *Fusarium sambucinum* Fuckel sensu stricto, *F. torulosum* (Berk. & Curt.) Nirenberg comb. nov. and *F. venenatum* Nirenberg sp. nov. *Mycopathologia*. 1995;129:131–141. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01103337>
8. Geiser D. M., Al-Hatmi A. M. S., Aoki T., Arie T., Balmas V., Barnes I., et al. Phylogenomic analysis of a 55.1 kb 19-gene dataset resolves a monophyletic *Fusarium* that includes the *Fusarium solani* species complex. *Phytopathologia*. 2021;111(7):1064–1079. DOI: <https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-20-0330-LE>
9. Peters J. C., Lees A. K., Cullen D. W., Sullivan L., Stroud G. P., Cunningham A. C. Characterization of *Fusarium* spp. responsible for causing dry rot of potato in Great Britain. *Plant Pathology*. 2008;57(2):262–271. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2007.01777.x>
10. Bojanowski A., Avis T. J., Pelletier S., Tweddell R. J. Management of potato dry rot. *Postharvest Biology and Technology*. 2013;84:99–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2013.04.008>
11. Stefańczyk E., Sobkowiak S., Brylińska M., Śliwka J. Diversity of *Fusarium* spp. associated with dry rot of potato tubers in Poland. *European Journal of Plant Pathology*. 2016;145:871–884. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10658-016-0875-0>
12. Du M., Ren X., Sun Q., Wang Y., Zhang R. Characterization of *Fusarium* spp. causing potato dry rot in China and susceptibility evaluation of Chinese potato germplasm to the pathogen. *Potato Research*. 2012;55:175–184. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11540-012-9217-6>
13. Gachango E., Hanson L. E., Rojas A., Hao J. J., Kirk W. W. *Fusarium* spp. causing dry rot of seed potato tubers in Michigan and their sensitivity to fungicides. *Plant Disease*. 2012;96(12):1767–1774. DOI: <https://doi.org/10.1094/PDIS-11-11-0932-RE>
14. Secor G. A., Salas B. *Fusarium* dry rot and *Fusarium* wilt. In: Stevenson W. R., Loria R., Franc G., Weingartner D. P. (Eds.). *Compendium of potato diseases*. St. Paul: APS Press, 2001. pp. 23–25.
15. Daami-Remadi M., Jabnoum-Khiareddine H., Ayed F., El Mahdjoub M. Effect of temperature on aggressivity of Tunisian *Fusarium* species causing potato (*Solanum tuberosum* L.) tuber dry rot. *biocontrol. Journal of Agronomy*. 2006;5(2):350–355. DOI: <https://doi.org/10.3923/ja.2006.350.355>
16. Estrada Jr. R., Gudmestad N. C., Rivera V. V., Secor G. A. *Fusarium graminearum* as a dry rot pathogen of potato in the USA: Prevalence, comparison of host isolate aggressiveness and factors affecting aetiology. *Plant Pathology*. 2010;59(6):1114–1120. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02343.x>

17. Gavrilova O., Orina A., Trubin I., Gagkaeva T. Identification and pathogenicity of *Fusarium* fungi associated with dry rot of potato tubers. *Microorganisms*. 2024;12(3):598. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms12030598>
18. Lombard L., Sandoval-Denis M., Lamprecht S. C., Crous P. W. Epitypification of *Fusarium oxysporum* – clearing the taxonomic chaos. *Persoonia*. 2019;43:1–47. DOI: <https://doi.org/10.3767/persoonia.2019.43.01>
19. Gavrilova O. P., Gannibal F. B., Gagkaeva T. Yu. *Fusarium* and *Alternaria* fungi in grain of oats grown in the North-Western Russia regarding cultivar specificity. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2016;51(1):111–118. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2016.1.111rus>
20. Khadieva G. F., Lutfullin M. T., Akosakh Y. A., Malova A. V., Mochalova N. K., Vologin S. G., et al. Analysis of fusarium micromycetes, isolated from infected potato tubers grown in the republic of Tatarstan. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2018;32(3):34–39. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-10307>
21. Prudnikova S. V., Churakov A. A., Ovsyankina S. V., Khizhnyak S. V. Isolation and identification of autochthonous pathogens of potato diseases common in the regions of Siberia. *Biotechnology of new materials – environment – quality of life: Proceedings of the IV International scientific conference*. Krasnoyarsk: *Sibirskiy federal'nyy universitet*, 2021. pp. 174–177. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=46578152>
22. Gagkaeva T. Yu., Orina A. S., Trubin I. I., Gavrilova O. P., Khyutti A. V. *Fusarium sambucinum*: causing dry tuber rot of potatoes. *Vestnik zashchity rasteniy* = Plant Protection News. 2023;106(3):137–145. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31993/2308-6459-2023-106-3-16041>
23. Orina A. S., Gavrilova O. P., Trubin I. I., Gagkaeva T. Yu. Effect of fungicides on fusarium fungi caused potato dry rot. *Agrokimiya*. 2024;3:37–42. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188124030057>

Сведения об авторах

✉ **Гэггаева Татьяна Юрьевна**, кандидат биол. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории микологии и фитопатологии, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений», ш. Подбельского, д. 3, г. Санкт-Петербург-Пушкин, Российская Федерация, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3276-561X>, e-mail: t.gagkaeva@mail.ru

Орина Александра Станиславовна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории микологии и фитопатологии, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений», ш. Подбельского, д. 3, г. Санкт-Петербург-Пушкин, Российская Федерация, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7657-6618>

Гаврилова Ольга Павловна, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории микологии и фитопатологии, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений», ш. Подбельского, д. 3, г. Санкт-Петербург-Пушкин, Российская Федерация, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5350-3221>

Трубин Илья Иванович, лаборант-исследователь лаборатории микологии и фитопатологии, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений», ш. Подбельского, д. 3, г. Санкт-Петербург-Пушкин, Российская Федерация, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru

Хюгги Александр Валерьевич, кандидат биол. наук, старший научный сотрудник лаборатории иммунитета растений к болезням, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений», ш. Подбельского, д. 3, г. Санкт-Петербург-Пушкин, Российская Федерация, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1479-7746>

Information about the author

✉ **Tatiana Yu. Gagkaeva**, PhD in Biology, leading researcher, the Laboratory of Mycology and Phytopathology, All-Russian Institute of Plant Protection (VIZR), Podbelskogo shosse, 3, St. Petersburg, Pushkin, Russian Federation, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3276-561X>, e-mail: t.gagkaeva@mail.ru

Aleksandra S. Orina, PhD in Biology, senior researcher, the Laboratory of Mycology and Phytopathology, All-Russian Institute of Plant Protection (VIZR), Podbelskogo shosse, 3, St. Petersburg, Pushkin, Russian Federation, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7657-6618>

Olga P. Gavrilova, PhD in Biology, senior researcher, the Laboratory of Mycology and Phytopathology, All-Russian Institute of Plant Protection (VIZR), Podbelskogo shosse, 3, St. Petersburg, Pushkin, Russian Federation, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5350-3221>

Ilya I. Trubin, research assistant, the Laboratory of Mycology and Phytopathology All-Russian Institute of Plant Protection (VIZR), Podbelskogo shosse, 3, St. Petersburg, Pushkin, Russian Federation, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru

Aleksandr V. Khiutti, PhD in Biology, senior researcher, the Laboratory of Plant Resistance to Diseases, All-Russian Institute of Plant Protection (VIZR), Podbelskogo shosse, 3, St. Petersburg, Pushkin, Russian Federation, 196608, e-mail: info@vizr.spb.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1479-7746>

✉ – Для контактов / Corresponding author

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.107-114>
УДК 633.11:632.938:632.4



Характеристика сортового генофонда мягкой яровой пшеницы Республики Татарстан по генетическим маркерам устойчивости к желтой ржавчине

© 2025. Н. Б. Баранова, В. В. Костенко✉, М. А. Пономарева

ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань, Российская Федерация

В Республике Татарстан мягкая яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.) занимает одно из ведущих мест в полевых севооборотах и ежегодно засеивается на площади более 400 тыс. га. Особую угрозу для посевов пшеницы представляют заболевания, вызываемые, в том числе фитопатогеном *Puccinia striiformis*, которые могут сокращать величину урожая до 90 %. В нашей работе было проведено генотипирование 25 сортов мягкой яровой пшеницы селекции Татарского НИИСХ в отношении генов устойчивости к желтой ржавчине – Yr1 (gwm311), Yr5 (S23M41 и S19M93), Yr10 (Xpsp3000), Yr15 (Xgwm413) и Yr17/Lr37/Sr38 (Ventriup/LN2). Для 56 % исследуемых сортов было выявлено наличие в генотипе маркера S23M41, ассоциированного с Yr5. Маркер S19M93 был идентифицирован для 84 % исследуемых сортов. Наличие маркера Xgwm413 установили для 32 % тестируемых сортов яровой пшеницы. Для всех изучаемых сортов получили отрицательные результаты идентификации молекулярного маркера Ventriup/LN2, ассоциированного с генами устойчивости к полосатой, листовой и стеблевой ржавчинам. Полученные результаты свидетельствуют о генетическом разнообразии данных сортов в отношении устойчивости к *P. striiformis*. Наличие сразу трех генов устойчивости к желтой ржавчине (Yr1, Y5 и Yr15) выявлено для сортов Баракат, Йолдыз, Казанская Юбилейная, Ситара, Экада 113 и Экада 214.

Ключевые слова: *Puccinia striiformis*, *Triticum aestivum* L., молекулярные маркеры, устойчивость, Yr-гены

Благодарности: работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («Приоритет-2030»).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Баранова Н. Б., Костенко В. В., Пономарева М. А. Характеристика сортового генофонда мягкой яровой пшеницы Республики Татарстан по генетическим маркерам устойчивости к желтой ржавчине. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2025;26(1):107–114. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.107-114>

Поступила: 07.10.2024 Принята к публикации: 06.02.2025 Опубликовано онлайн: 26.02.2025

Characteristics of the varietal gene pool of soft spring wheat in the Republic of Tatarstan according to genetic markers of resistance to stripe (yellow) rust

© 2025. Natalia B. Baranova, Victoria V. Kostenko✉, Mira L. Ponomareva

Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russian Federation

In the Republic of Tatarstan, common spring wheat (*Triticum aestivum* L.) occupies a leading position in crop rotations and is sown annually on more than 400,000 hectares. Diseases caused by the phytopathogen *Puccinia striiformis*, which can reduce yields by up to 90 %, are a particular threat to wheat crops. In our work, 25 breeding cultivars of soft spring wheat bred by the Tatar Scientific Research Institute of Agriculture were genotyping for yellow rust resistance genes – Yr1 (gwm311), Yr5 (S23M41 and S19M93), Yr10 (Xpsp3000), Yr15 (Xgwm413) and Yr17/Lr37/Sr38 (Ventriup/LN2). The presence of the Yr5-associated marker S23M41 in the genotype was detected in 56 % of the tested cultivars. The S19M93 marker was identified in 84 % of the studied cultivars. The presence of the Xgwm413 marker was detected in 32 % of the tested spring wheat varieties. Negative results were obtained for the identification of the molecular marker Ventriup/LN2 associated with genes for resistance to stripe, leaf and stem rust in all the studied cultivars. The results obtained indicate the genetic diversity of these cultivars with regard to resistance to *P. striiformis*. The presence of three yellow rust resistance genes (Yr1, Y5 and Yr15) was detected for 'Barakat', 'Yoldyz', 'Kazanskaya Yubileynaya', 'Sitara', 'Ekada 113' and 'Ekada 214'.

Keywords: *Puccinia striiformis*, *Triticum aestivum* L., molecular markers, resistance, Yr-genes

Acknowledgments: the research was carried out using the funds of the Strategic Academic Leadership Program "Priority 2030" of the Kazan Federal University of the Government of the Russian Federation.

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: Baranova N. B., Kostenko V. V., Ponomareva M. L. Characteristics of the varietal gene pool of soft spring wheat in the Republic of Tatarstan according to genetic markers of resistance to stripe (yellow) rust. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):107–114. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.107-114>

Received: 07.10.2024

Accepted for publication: 06.02.2025

Published online: 26.02.2025

Желтая ржавчина, вызываемая фитопатогеном *Puccinia striiformis*, представляет собой прогрессирующее заболевание пшеницы, которое распространяется на новые регионы. Болезнь снижает способность к фотосинтезу, увеличивает транспирацию и уменьшает накопление органических веществ, что приводит к снижению качества зерна и значительным потерям урожая. Желтая ржавчина пшеницы имеет свыше 300 растений-хозяев и зарегистрирована более чем в 60 странах и на всех континентах, кроме Антарктиды [1]. Способность возбудителя к мутациям и быстрой смене поколений ускоряет появление вирулентных рас патогена, преодолевающих специфические гены устойчивости. Урединиоспоры обладают способностью разноситься ветром на большие расстояния, которые при высоком давлении инокулята могут распространяться на тысячи километров от первоначальных очагов заражения [2].

Глобальное распространение и быстрая эволюция возбудителя желтой ржавчины способствуют широкому применению фунгицидов [3], использование которых является экологически опасным и экономически не выгодным способом защиты. Для предотвращения масштабных эпифитотий необходимо создавать сорта с генетически детерминированным высоким уровнем устойчивости, поскольку возделывание таких сортов – один из наиболее эффективных способов защиты посевов [4]. Для успешной селекционной работы по созданию устойчивых сортов необходимы знания о генетике устойчивости растений, надежные методики отбора и ежегодный фитосанитарный мониторинг.

Желтая ржавчина может поражать восприимчивые сорта пшеницы на любой стадии роста, пока части растений зеленые. Существует два основных типа устойчивости – общая устойчивость или устойчивость на всех стадиях (также называемая устойчивостью рассады/саженцев/проростков (ASR)) и устойчивость взрослых растений (APR) [5]. Общая устойчивость зависит от расы патогена, моногенно наследуется, легко обнаруживается при тестировании проростков и остается эффективной на всех стадиях роста при условии, что во всех оценках используется один и тот же патотип *P. striiformis*. Устойчивость проростков контролируется несколькими генами с основными эффектами или простыми комбинациями отдельных генов. Устойчивость взрослого растения определяется

одним или несколькими локусами, описывается как количественно наследуемая, не зависящая от расы и обеспечивающая длительную устойчивость [6].

Согласно «Каталогу генных символов...», идентифицировано более 80 генов с официальными или временными обозначениями устойчивости к желтой ржавчине¹. Эффективность устойчивости к желтой ржавчине может быть преодолена появлением новых рас патогенов. Большинство из генов устойчивости являются доминантными и специфичными для расы. Поэтому выявление новых источников устойчивости сорта имеет первостепенное значение для эффективной борьбы с болезнями.

Фитопатологические методы, основанные на симптоматике, не всегда эффективны для идентификации генов устойчивости. Оценка в полевых условиях является дорогостоящей, требующей больших временных затрат и сильно зависящей от условий окружающей среды. Основой для выведения сортов пшеницы, устойчивых к ржавчине, должен быть разнообразный и эффективный генетический ресурс резистентности.

Яровая мягкая пшеница занимает одно из ведущих мест в полевых севооборотах Республики Татарстан, которая входит в ТОП-20 крупнейших регионов по посевным площадям этой культуры. Постоянное возрастание значения пшеницы в экономике республики обусловлено комплексом ценных свойств культуры, многоцелевым использованием и постоянно востребованным экспортным потенциалом. В 2023 году площади под яровой пшеницей составили около четверти всей пашни в Республике Татарстан – 500 тыс. га.

Исследования в отношении желтой ржавчины проводятся лишь по нескольким программам в мире, в РФ они единичны и в основном касаются полевой устойчивости [7]. Это особенно важно для сортов яровой пшеницы, созданных непосредственно в ТатНИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН или в сотрудничестве с другими селекционными учреждениями РФ, доля которых в агропроизводстве Республики Татарстан составляет 50 %. Генетическое разнообразие выращиваемых сортов по генам устойчивости, контролирующим данное заболевание, обеспечивает безпестицидную защиту пшеницы от данного патогена.

¹Wheat Gene Catalogue documents. GrainGenes – A Database for Triticeae and Avena. 2024. [Электронный ресурс]. URL: https://wheat.pw.usda.gov/GG3/Wheat_Gene_Catalog_Documents (дата обращения: 26.06.2024).

В связи с этим молекулярные маркеры, связанные с устойчивостью к *P. striiformis*, станут наиболее эффективным способом выявления этих факторов. Изучение генетического разнообразия сортового генофонда в отношении маркеров устойчивости к желтой ржавчине ранее не проводилось в Республике Татарстан.

Цель исследований – идентификация ДНК-маркеров, ассоциированных с генами устойчивости к желтой ржавчине высокоурожайных сортов мягкой яровой пшеницы, созданных в Республике Татарстан.

Научная новизна – впервые проведено генотипирование высокоурожайных сортов мягкой яровой пшеницы, созданных в Республике Татарстан, в отношении ДНК-маркеров, ассоциированных с генами устойчивости к желтой ржавчине gwm311 (*Yr1*), S23M41 и S19M93 (*Yr5*), Xpsp3000 (*Yr10*), Xgwm413 (*Yr15*) и Ventriup/LN2 (*Yr17/Lr37/Sr38*).

Материал и методы. В работе были использованы селекционные сорта мягкой яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.), любезно предо-

ставленные ТатНИИСХ ФИЦ КазНЦ РАН [https://knc.ru/tatniva/679/].

ДНК выделяли из листьев 7-дневных растений с помощью коммерческого набора («diaGene», Россия) из растительных тканей на спин-колонках согласно протоколу фирмы-изготовителя. Для амплификации маркерных последовательностей, ассоциированных с генами устойчивости к желтой ржавчине *T. aestivum* L., использовали олигонуклеотидные праймеры, синтезированные в «Евроген» (Москва, Россия), на основе соответствующих нуклеотидных последовательностей. Полимеразную цепную реакцию (ПЦР) проводили в объеме 25 мкл в микроцентрифужных пробирках на программируемом амплификаторе «Терцик» («ДНК-технология», Россия). Реакционная смесь включала следующие компоненты: 100 мМ трис-НСl (рН 8,7); 50 мМ KCl; 2-3 мМ MgCl₂; 0,2 мМ дНТФ; 1 ед. Taq-полимеразы; 0,02 нг каждого праймера и исследуемую ДНК. Нуклеотидные последовательности праймеров представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Молекулярные маркеры, использованные для идентификации *Yr*-генов устойчивости яровой мягкой пшеницы к желтой ржавчине /

Table 1 – Molecular markers used for identification of *Yr*-genes of spring soft wheat resistance to yellow rust

Ген / Gene	Тип маркера / Marker type	Название маркера / Marker name	Последовательность праймера 5' → 3' / Primer sequence 5' → 3'	Ожидаемый размер ампликона (н.н.) / Fragment size (bp)	Ссылка / Reference
<i>Yr1</i>	SSR	gwm311	TCACGTGGAAGACGCTCC CTACGTGCACCACCATTTT	143	[8]
<i>Yr5</i>	STS	S23M41	TCAACGGAACCTCCAATTTC AGGTAGGTGTTCCAGCTTGC	275	[9]
	STS	S19M93	TAATTGGGACCGAGAGACG TTCTTGACAGCTCCAAAACCT	100	[9]
<i>Yr9</i>	SSR	IB-267	GCAAGTAAGCAGCTTGATTTAGC AATGGATGTCCCGGTGAGTGG	267	[10]
<i>Yr10</i>	SSR	Xpsp3000	GCAGACCTGTGTCAATTGGTC GATATAGTGGCAGCAGCAGGATAC	+260 –240	[11]
<i>Yr15</i>	SSR	Xgwm413	TGCTTGCTAGATTGCTTGGG GATCGTCTCGTCTTGCA	96	[12]
<i>Yr17/Lr37/Sr38</i>	SCAR	Ventriup/LN2	AGGGGCTACTGACCAAGGCT TGCAGCTACAGCAGTATGTACACAAAA	262	[13]

Результаты и их обсуждение. В настоящее время селекционные программы на устойчивость к желтой ржавчине базируются на относительно небольшом спектре генов устойчивости, среди которых селекционеры предпочитают *Yr5*, *Yr10*, *Yr15*, *Lr37/Yr17* и *Lr76/Yr70*. Различные комбинации этих генов дают наи-

лучшие полевые результаты защиты растений от фитопатогена *P. striiformis*. В нашей работе впервые было проведено генотипирование 25 сортов мягкой яровой пшеницы, созданных в Республике Татарстан, в отношении генов устойчивости к желтой ржавчине (рис. 1, табл. 2).

Идентификация гена *Yr1*. Для идентификации гена устойчивости *Yr1* в геноме пшеницы исследуемых сортов использовали SSR-маркер gwm311, который локализован в хромосоме 2AL и располагается на расстоянии 5,0 см от гена *Yr1*. Согласно данным литературы, наличие этого гена обеспечивает устойчивость пшеницы к изолятам *Pst-21*, *Pst-87/7*, *Pst-08/21* [14]. В наших исследованиях у 60 % образцов идентифицирован ген *Yr1* по наличию ампликона размером 143 п. н. (рис. 1А, табл. 2).

Идентификация гена *Yr5*. Известно, что ген *Yr5* в геном мягкой пшеницы перенесен из полбы и имеет локализацию на хромосоме 2BL. Впервые этот ген был идентифицирован Р. К. Ф. Масер (R. C. F. Maser, 1966) [15] с помощью моносомного анализа. Показано, что

практически все изоляты *P. striiformis*, за исключением некоторых из Индии и Австралии, авируленты к *Yr5*, что делает целесообразным введение этого гена в селекционные программы по созданию высокоустойчивых сортов пшеницы [16]. Для идентификации гена *Yr5* нами были использованы две STS-маркерные последовательности S23M41 и S19M93, которые тесно сцеплены с геном и амплифицируют фрагменты размером 275 и 100 п.н. соответственно [1]. Согласно полученным нами данным, ампликон размером 275 п.н. выявлен у 14 образцов (56 %) (рис. 1В), тогда как ампликон размером 100 п.н. обнаружен у 21 образца (84 %) (рис. 1Б). Оба маркера были выявлены у 13 исследуемых сортов пшеницы (52 %). Сорта Амир, Хаят и Экада 247 не имели ни одного маркера устойчивости по гену *Yr5* (табл. 2).

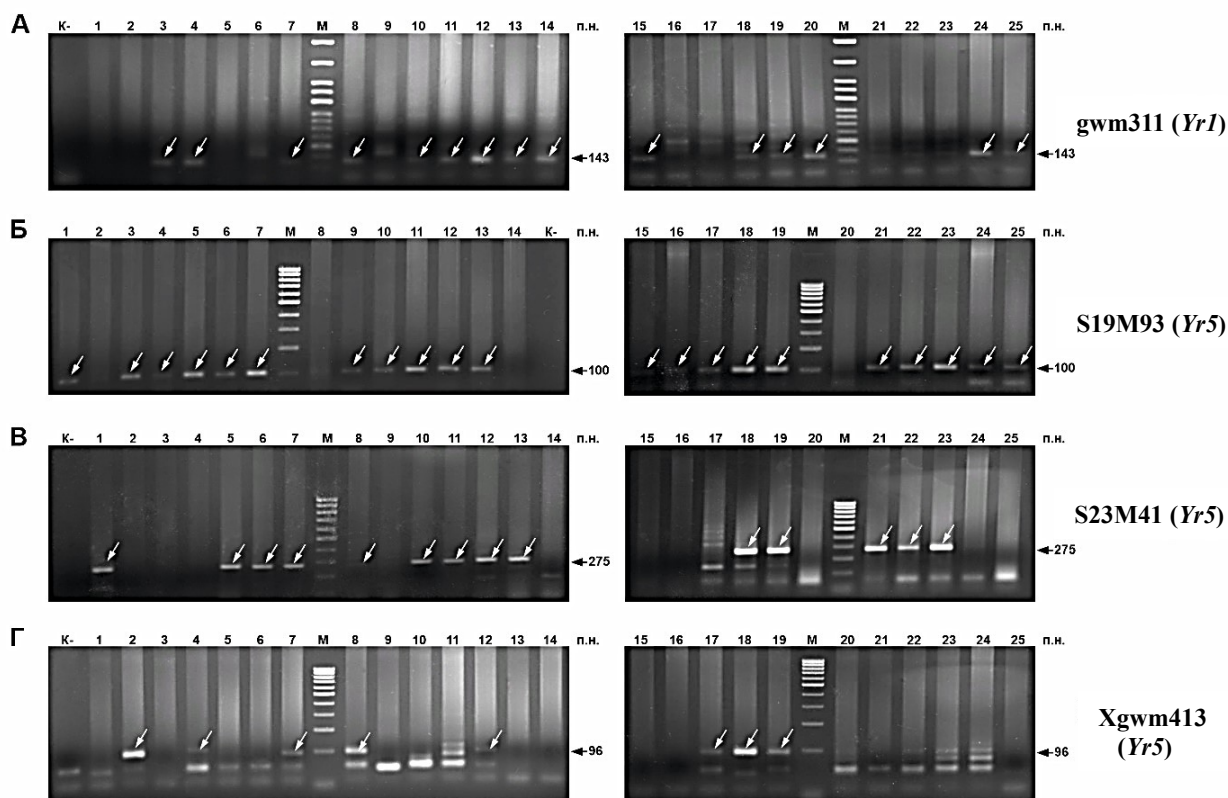


Рис. 1. Электрофореграммы продуктов амплификации маркерных последовательностей gwm311 (А), S19M93 (Б), S23M41 (В) и Xgwm413 (Г). Дорожки: К – отрицательный контроль, М – маркер (Step 50 для А; Step 100 для Б, В, Г). Сорта мягкой яровой пшеницы: 1 – Аль Варис, 2 – Амир, 3 – Балкыш, 4 – Баракат, 5 – Буляк, 6 – Иделле, 7 – Йолдыз, 8 – Казанская юбилейная, 9 – Надира, 10 – Наставник, 11 – Сакара, 12 – Ситара, 13 – Хазинэ, 14 – Хаят, 15 – Чистопольская, 16 – Экада 66, 17 – Экада 109, 18 – Экада 113, 19 – Экада 214, 20 – Экада 247, 21 – Экада 253, 22 – Экада 258, 23 – Экада 265, 24 – Экада 282, 25 – 100 лет ТАССР) /

Fig. 1. Electrophoregrams of amplification products of marker sequences gwm311 (A), S19M93 (B), S23M41 (B) and Xgwm413 (Г). Tracks: K – negative control, M – marker (Step 50 for A; Step 100 for Б, В, Г). Cultivar of soft spring wheat: 1 – ‘Al Waris’, 2 – ‘Amir’, 3 – ‘Balkysh’, 4 – ‘Barakat’, 5 – ‘Bulyak’, 6 – ‘Idelle’, 7 – ‘Yoldyz’, 8 – ‘Kazanskaya Yubileynaya’, 9 – ‘Nadira’, 10 – ‘Nastavnik’, 11 – ‘Sakara’, 12 – ‘Sitara’, 13 – ‘Khazine’, 14 – ‘Hayat’, 15 – ‘Chistopolskaya’, 16 – ‘Ekada 66’, 17 – ‘Ekada 109’, 18 – ‘Ekada 113’, 19 – ‘Ekada 214’, 20 – ‘Ekada 247’, 21 – ‘Ekada 253’, 22 – ‘Ekada 258’, 23 – ‘Ekada 265’, 24 – ‘Ekada 282’, 25 – ‘100 let TASSR’)

Таблица 2 – Результаты ПЦР-анализа на маркеры к генам устойчивости яровой мягкой пшеницы к желтой ржавчине /

Table 2 – Results of PCR analysis for markers to yellow rust resistance genes of spring soft wheat

<i>Copm / Cultivar</i>	<i>Регион допуска¹ / Region of admission¹</i>	<i>Выявленные маркеры устойчивости пшеницы к желтой ржавчине / Identified markers of wheat resistance to yellow rust</i>
Аль Варис / 'Al Waris'	7	S23M41 (Yr5), S19M93 (Yr5)
Амир / 'Amir'	2, 4	Xgwm413 (Yr15)
Балкыш / 'Balkysh'	7	gwm311 (Yr1), S19M93 (Yr5)
Баракат / 'Barakat'	-	gwm311 (Yr1), S19M93 (Yr5), Xgwm413 (Yr15)
Буляк / 'Bulyak'	9	S23M41 (Yr5), S19M93 (Yr5)
Иделле / 'Idelle'	7	S23M41 (Yr5), S19M93 (Yr5)
Йолдыз / 'Yoldyz'	4, 5, 7	gwm311 (Yr1), S23M41 (Yr5), S19M93 (Yr5), Xgwm413 (Yr15)
Казанская юбилейная / 'Kazanskaya yubileynaya'	7	gwm311 (Yr1), S23M41 (Yr5), Xgwm413 (Yr15)
Надира / 'Nadira'	4, 7, 9	S19M93 (Yr5)
Наставник / 'Nastavnik'	-	gwm311 (Yr1), S23M41 (Yr5), S19M93 (Yr5)
Сакара / 'Sakara'	-	gwm311 (Yr1), S23M41 (Yr5), S19M93 (Yr5)
Ситара / 'Sitara'	4, 7	gwm311 (Yr1), S23M41 (Yr5), S19M93 (Yr5), Xgwm413 (Yr15)
Хазинэ / 'Khazine'	9	gwm311 (Yr1), S23M41 (Yr5), S19M93 (Yr5)
Хаят / 'Hayat'	7	gwm311 (Yr1)
Чистопольская / 'Chistopolskaya'	-	gwm311 (Yr1), S19M93 (Yr5)
Экада 66 / 'Ekada 66'	7	S19M93 (Yr5)
Экада 109 / 'Ekada 109'	4, 5, 7, 9	S19M93 (Yr5), Xgwm413 (Yr15)
Экада 113 / 'Ekada 113'	7, 9	gwm311 (Yr1), S23M41 (Yr5), S19M93 (Yr5), Xgwm413 (Yr15)
Экада 214 / 'Ekada 214'	3, 4, 7	gwm311 (Yr1), S23M41 (Yr5), S19M93 (Yr5), Xgwm413 (Yr15)
Экада 247 / 'Ekada 247'	-	gwm311 (Yr1)
Экада 253 / 'Ekada 253'	3, 9	S23M41 (Yr5), S19M93 (Yr5)
Экада 258 / 'Ekada 258'	4, 9	S23M41 (Yr5), S19M93 (Yr5)
Экада 265 / 'Ekada 265'	9	S23M41 (Yr5), S19M93 (Yr5)
Экада 282 / 'Ekada 282'	9	gwm311 (Yr1), S19M93 (Yr5)
100 лет ТАССР / '100 let TASSR'	7, 9	gwm311 (Yr1), S19M93 (Yr5)

¹Регионы допуска приведены согласно данным «Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. Сорты растений (официальное издание)»: 2 – Северо-Западный; 3 – Центральный; 4 – Волго-Вятский; 5 – Центрально-Черноземный; 7 – Средневолжский; 9 – Уральский /

¹Regions of admission are given according to the data of the "State Register of Selection Achievements Admitted for Usage (National list). T.1. Plant varieties (official publication)": 2 – NorthWestern; 3 – Central; 4 – Volgo-Vyatka; 5 – Central Black earth; 7 – Middle Volga; 9 – Ural

Идентификация гена Yr9. Устойчивость пшеницы к желтой ржавчине обусловлена также наличием в генотипе гена Yr9, который получен от ржи путем транслокации 1BL/1RS. Комбинация Yr9 с другими Yr-генами может способствовать увеличению устойчивости сортов пшеницы к *P. striiformis*. Так, в недавней работе Л. В. Равишанкар с коллегами (L. V. Ravishankar et al., 2024) было показано, что комбинация

Yr9 с такими генами, как Yr2, Yr16, Yr17, Yr18, Yr29 дает наилучшие результаты полевых испытаний фенотипической устойчивости растений [10]. В нашей работе наличие SSR-маркера IB-267, сцепленного с геном Yr9 и дающего ампликон размером 267 п.н., не выявлено ни в одном из тестируемых сортов пшеницы.

Идентификация гена Yr10. Доминантный ген Yr10 впервые был выявлен у линии турецкой

пшеницы P.I.178383 [11]. Кроме этого, альтернативные источники гена устойчивости к полосатой ржавчине *Yr10* обнаружены в образцах *T. spelta* 415 [17] и *T. vavilovii* AUS22498 [18]. Ген *Yr10* относится к группе ASR-генов устойчивости пшеницы к желтой ржавчине, которые эффективны на всех этапах развития растения. По данным литературы известно, что все расы *P. striiformis* подвержены действию гена *Yr10* в Китае, Индии, Пакистане, Иране, США и Казахстане [19]. В нашей работе для идентификации гена *Yr10* использовали микросателлитный маркер Xpsp3000, локализованный проксимальнее гена на 1,3 сМ в хромосоме 1BS. Указанный маркер при амплификации дает два типа полос – 260 п. н. (для генотипов, устойчивых к *P. striiformis*) и 240 п.н. (для генотипов, чувствительных к *P. striiformis*). Таким образом, данный ген является доминантным и проявляет расоспецифичность. Поэтому ген *Yr10* рекомендуют использовать для пирамидирования (одновременного отбора и/или введения сразу нескольких генов, что обеспечивает комплементарную малоэффективных генов) и маркерной селекции (MAS) в программах селекции на устойчивость к желтой ржавчине. Генотипирование сортов мягкой яровой пшеницы, созданных в Татарстане, по гену *Yr10* позволило идентифицировать аллель, дающую ампликон размером 240 п.н. у 68 % анализируемых сортов.

Идентификация гена *Yr15*. Впервые ген *Yr15* открыли З. К. Герехтер-Амитай с соавторами (Z. K. Gerechter-Amitai et al., 1989) при изучении характера устойчивости *Triticum dicoccoidese* sel. G-25 к желтой ржавчине [20]. Ген *Yr15* локализован на коротком плече хромосомы 1B, при этом ряд исследователей предполагают, что ген *Yr15* может находиться внутри тесно связанного кластера генов хромосомы 1BS (*Yr9*, *Yr10*, *Yr24* и *YrH52*) [21]. Согласно данным литературы, ген *Yr15* обеспечивает широкую устойчивость к более чем 3000 генетически различным изолятам *P. striiformis* по всему миру, включая современные расы Warrior (DR09/11) [22]. Используемый в нашей работе микросателлитный маркер Xgwm413 расположен на 4.4 сМ проксимальнее от гена *Yr15*. Молекулярно-генетический скрининг сортов яровой мягкой пшеницы селекции Татарского НИИСХ позволил установить наличие маркера Xgwm413 для 32 % тестируемых образцов (рис. 1Г).

Идентификация гена *Yr17*. Для идентификации гена *Yr17* использовали SCAR-маркер *Yr17/Lr37/Sr38*, представляющий собой транс-

локацию 2NS/2AS, которая является широко распространенной интрогрессией и эффективна против некоторых распространенных патотипов *Pst* и других видов ржавчины [23]. Наличие гена *Yr17* в генотипе обусловлено доминантной аллелью Ventriup/LN2, дающей при амплификации фрагмент размером 262 п.н., а восприимчивые сорта не амплифицируют данный фрагмент. Молекулярный маркер Ventriup/LN2, ассоциированный с генами устойчивости к желтой, листовой и стеблевой ржавчинам, отсутствовал у всех изученных сортов.

В результате проведенных исследований установлено, что сорта Баракат, Йолдыз, Казанская Юбилейная, Ситара, Экада 113 и Экада 214 предварительно несут по 3 идентичных гена устойчивости к полосатой ржавчине (*Yr1*, *Yr5* и *Yr15*). У 32 % сортов (Балкыш, Наставник, Сакара, Хазинэ, Чистопольская, Экада 109, Экада 282 и 100 лет ТАССР) идентифицированы по 2 гена устойчивости в разных сочетаниях, что может свидетельствовать о генетическом разнообразии созданных сортов яровой пшеницы по устойчивости к этому заболеванию. Следует отметить, что некоторые из указанных сортов являются носителями гена *Yr10*, но в его рецессивном состоянии. Смена генетически защищенных сортов позволит снизить вероятность эпифитотий и стабилизировать популяционный состав фитопатогенов. Полученную информацию о представленности *Yr*-генов в районированных и перспективных сортах яровой мягкой пшеницы следует использовать в региональных селекционных программах. Применение молекулярных маркеров упрощает процесс идентификации *Yr*-генов, но для подтверждения результатов ДНК-скрининга необходимо провести фитопатологические тесты выделенных сортов на устойчивость к *P. striiformis*. Так, в работе [1] было показано, что сорта пшеницы с идентифицированными маркерами по генам *Yr5* и *Yr15* в условиях полевой оценки по среднему значению коэффициента заражения характеризовались как обладающие высоким уровнем устойчивости взрослых растений к желтой ржавчине.

Для сортов пшеницы, которые отобрали для анализа ДНК-маркеров, ассоциированных с *Yr*-генами, полевая оценка на устойчивость к желтой ржавчине еще не проводилась. Это связано с тем, что серьезная эпифитотия на территории Республики Татарстан впервые была зарегистрирована в 2021 г. Согласно данным селекционеров-авторов изучаемых нами сортов

яровой пшеницы [24], в условиях Татарстана за последние 10 лет (2009–2018 гг.) наблюдается массовое развитие стеблевой ржавчины, мучнистой росы, темно-бурой листовой пятнистости, листовой бурой ржавчины, но данные заболевания носят эпифитотийный характер. Максимальная устойчивость к мучнистой росе отмечена у сортов Ситара и Баракат (9–8 баллов). Практической устойчивостью к твердой головне обладает сорт Ситара (1 балл), слабовосприимчив сорт Хазинэ (2 балла). По устойчивости к стеблевой ржавчине выделяются сорта Хазинэ, Балкыш, Баракат, степень поражения которых при эпифитотии 10, 15 и 20 % соответственно. Новые сорта, кроме Баракат, обладают полевой устойчивостью к темно-бурой листовой пятнистости. Сорт Хазинэ не поражен листовой бурой ржавчиной и имел комплексную устойчивость к грибным заболеваниям.

Заключение. Таким образом, в отношении генов устойчивости к желтой ржавчине проведено генотипирование ряда сортов мягкой яровой пшеницы, возделываемых в Республике Татарстан и других регионах Российской Федерации. Полученные результаты свидетельствуют о генетическом разнообразии данных сортов в отношении устойчивости к *P. striiformis*. Наличие сразу трех генов устойчивости к желтой ржавчине (*Yr1*, *Y5* и *Yr15*) обнаружено у сортов Баракат, Йолдыз, Казанская Юбилейная, Ситара, Экада 113 и Экада 214.

Выявление высокоэффективных *Yr*-генов устойчивости к *P. striiformis* дает возможность защитить пшеницу, а сорта, несущие гены устойчивости, целесообразно использовать в селекции для создания сортов и гибридов, устойчивых к данному фитопатогену.

References

1. Kokhmetova A., Rsaliyev A., Malysheva A., Atishova M., Kumarbayeva M., Keishilov Z. Identification of Stripe Rust Resistance Genes in Common Wheat Cultivars and Breeding Lines from Kazakhstan. *Plants* (Basel). 2021;10(11):2303. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10112303>
2. Chen W., Wellings T., Chen C., Kang X., Liu Z. Wheat stripe (yellow) rust caused by *Puccinia striiformis* f. sp. *Tritici*. *Molecular Plant Pathology*. 2014;15(5):433–446. DOI: <https://doi.org/10.1111/mpp.12116>
3. Carmona M. A., Sautua F. J., Pérez-Hernández O., Grosso C., Vettorello L., Milanese B., Corvi E., Almada G., Hovmöller M. S. Rapid emergency response to yellow rust epidemics caused by newly introduced lineages of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in Argentina. *Tropical Plant Pathology*. 2019;44:385–391. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40858-019-00295-y>
4. Swarup S., Cargill E. J., Crosby K., Flagel L., Kniskern J., Glenn K. C. Genetic diversity is indispensable for plant breeding to improve crops. *Crop Science*. 2021;61(2):839–852. DOI: <https://doi.org/10.1002/csc2.20377>
5. Chen X. M. High temperature adult plant resistance, key for sustainable control of stripe rust. *American Journal of Plant Sciences*. 2013;4(3):608–627. DOI: <https://doi.org/10.4236/ajps.2013.43080>
6. Chen X. Pathogens which threaten food security: *Puccinia striiformis*, the wheat stripe rust pathogen. *Food Security*. 2020;12(2):239–251. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12571-020-01016-z>
7. Волкова Г. В., Матвеева И. П., Дерова Т. Г., Шишкин Н. В., Марченко Д. М. Источники устойчивости к желтой ржавчине (возбудитель *Puccinia striiformis* West.) Среди селекционного и коллекционного материала озимой пшеницы ФГБНУ «АНЦ «Донской». *Зерновое хозяйство России*. 2020;(4):69–76. DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2020-70-4-69-76> EDN: NGCOIF
8. Volkova G. V., Matveeva I. P., Derova T. G., Shishkin N. V., Marchenko D. M. The sources of yellow rust resistance (the causative agent *Puccinia striiformis* West.) among the breeding and collection material of winter wheat developed in the FSBSI “ARC “Donskoy”. *Zernovoe khozyaystvo Rossii* = Grain Economy of Russia. 2020;(4):69–76. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2020-70-4-69-76>
9. Röder M. S., Korzun V., Wendehake K., Plaschke J., Tixier M. H., Leroy P., Ganal M. W. A microsatellite map of wheat. *Genetics*. 1998;149(4):2007–2023. DOI: <https://doi.org/10.1093/genetics/149.4.2007>
10. Smith P. H., Hadfield J., Hart N. J., Koebner R. M. D., Boyd L. A. STS markers for the wheat yellow rust resistance gene *Yr5* suggest a NBS-LRR-type resistance gene cluster. *Genome*. 2007;50(3):259–265. DOI: <https://doi.org/10.1139/g07-004>
11. Ravishankar L. V., Pandey M. K., Dey T., Singh A., Rasool B., Diskit S., et al. Phenotyping and molecular characterization of durable resistance in bread wheat for stripe rust (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*). *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*. 2024;18(4):710–720. DOI: <https://doi.org/10.1166/jbmb.2024.2407>
12. Wang L. F., Ma J. X., Zhou R. H., Wang X. M., Jia J. Z. Molecular tagging of the yellow rust resistance gene *Yr10* in common wheat, P.I.178383 (*Triticum aestivum* L.). *Euphytica*. 2002;124:71–73. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1015689817857>
13. Peng J. H., Fahima T., Röder M. S., Huang Q. Y., Dahan A., Li Y. C., Grama A., Nevo E. High-density molecular map of chromosome region harboring stripe-rust resistance genes *YrH52* and *Yr15* derived from wild emmer wheat, *Triticum dicoccoides*. *Genetica*. 2000;109(3):199–210. DOI: <https://doi.org/10.1023/a:1017573726512>
14. Lagudah E. S., McFadden H., Singh R. P., Huerta-Espino J., Bariana H. S., Spielmeier W. Molecular genetic characterization of the *Lr34/Yr18* slow rusting resistance gene region in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*. 2006;114:21–30. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00122-006-0406-z>

14. Bansal U. K., Hayden M. J., Keller B., Wellings C. R., Park R. F., Bariana H. S. Relationship between wheat rust resistance genes *Yr1* and *Sr48* and a microsatellite marker. *Plant Pathology*. 2009;58(6):1039–1043. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2009.02144.x>
15. Macer R. C. F. The formal and monosomic genetic analysis of stripe rust (*Puccinia striiformis*) resistance in wheat. *Proceedings of the 2nd international wheat genetics symposium, Lund, Sweden*. 1966;(2):127–142.
16. Sharma-Poudyal D., Chen X. M., Wan A. M., Zhan G. M., Kang Z. S., Cao S. Q., et al. Virulence Characterization of International Collections of the Wheat Stripe Rust Pathogen, *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*. *Plant Disease*. 2013;97(3):379–386. DOI: <https://doi.org/10.1094/PDIS-01-12-0078-RE>
17. Kemma G. H. J., Lange W. Resistance in spelt wheat to yellow rust. II: Monosomic analysis of the Iranian accession 415. *Euphytica*. 1992;63:219–224. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00024547>
18. Bariana H. S., Brown G. N., Ahmed N. U., Khatkar S., Conner R. L., Wellings C. R., et al. Characterisation of *Triticum vavilovii*-derived stripe rust resistance using genetic, cytogenetic and molecular analyses and its marker-assisted selection. *Theoretical and Applied Genetics*. 2002;104:315–320. DOI: <https://doi.org/10.1007/s001220100767>
19. Ul Islam B., Mir S., Dar M. S., Khan G. H., Shikari A. B., Sofi N. U. R., et al. Characterization of pre-breeding wheat (*Triticum aestivum* L.) germplasm for stripe rust resistance using field phenotyping and genotyping. *Plants (Basel)*. 2023;12(18):3239. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12183239>
20. Gerechter-Amitai Z. K., Van Silfhout C. H., Grama A., Kleitman F. *Yr 15* - a new gene for resistance to *Puccinia striiformis* in *Triticum dicoccoides* sel. G-25. *Euphytica*. 1989;43:187–190. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00037912>
21. Yaniv E., Raats D., Ronin Y., Korol A. B., Grama A., Bariana H., Dubcovsky J., Schulman A. H. Evaluation of marker-assisted selection for the stripe rust resistance gene *Yr15*, introgressed from wild emmer wheat. *Molecular Breeding*. 2015;35:43. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11032-015-0238-0>
22. Klymiuk V., Yaniv E., Huang L., Raats D., Fatiukha A., Chen S., et al. Cloning of the wheat *Yr15* resistance gene sheds light on the plant tandem kinase-pseudokinase family. *Nature Communications*. 2018;9:3735. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06138-9>
23. Agarwal P., Jha S. K., Sharma N. K., Raghunandan K., Mallick N., Niranjana M., Saharan M.S., Singh J.B., Vinod. Identification of the improved genotypes with 2NS/2AS translocation through molecular markers for imparting resistance to multiple biotic stresses in wheat. *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding*. 2021;81(04):522–528. DOI: <https://doi.org/10.31742/IJGPB.81.4.4>
24. Василова Н. З., Асхадуллин Д-л Ф., Асхадуллин Д-р Ф., Багавиева Э. З., Тазутдинова М. Р., Хусаинова И. И. Достижения селекции яровой мягкой пшеницы в Татарстане. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2019;(2(30)):124–131. DOI: <https://doi.org/10.24411/2309-348X-2019-11102> EDN: KZXAFM
- Vasilova N. Z., Askhadullin D-l F., Askhadullin D-r F., Bagavieva E. Z., Tazutdinova M. R., Khusainova I. I. Achieving the breeding of spring soft wheat in Tatarstan. *Zernobobovye i krupyanye kul'tury* = Legumes and Groat Crops. 2019;(2(30)):124–131. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/2309-348X-2019-11102>

Сведения об авторах

Баранова Наталья Борисовна, кандидат биол. наук, доцент кафедры генетики Института фундаментальной медицины и биологии, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация, 420008, e-mail: public.mail@kpfu.ru,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9109-7378>

✉ **Костенко Виктория Викторовна**, кандидат биол. наук, доцент кафедры генетики Института фундаментальной медицины и биологии, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация, 420008, e-mail: public.mail@kpfu.ru,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1118-1471>, e-mail: yvkostenko1@gmail.com

Пonomарева Мира Леонидовна, доктор биол. наук, профессор кафедры генетики Института фундаментальной медицины и биологии, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, Республика Татарстан, Российская Федерация, 420008, e-mail: public.mail@kpfu.ru,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1648-3938>

Information about the authors

Natalia B. Baranova, PhD in Biological Science, associate professor, the Department of Genetics, Institute of Fundamental Medicine and Biology, Kazan (Volga region) Federal University, st. Kremlevskaya, 18, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation, 420008, e-mail: public.mail@kpfu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9109-7378>

✉ **Victoria V. Kostenko**, PhD in Biological Science, associate professor, the Department of Genetics, Institute of Fundamental Medicine and Biology, Kazan (Volga Region) Federal University, st. Kremlevskaya, 18, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation, 420008, e-mail: public.mail@kpfu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1118-1471>, e-mail: yvkostenko1@gmail.com

Mira L. Ponomareva, DSc in Biological Science, professor at the Department of Genetics, Institute of Fundamental Medicine and Biology, Kazan (Volga Region) Federal University, st. Kremlevskaya, 18, Kazan, Republic of Tatarstan, Russian Federation, 420008, e-mail: public.mail@kpfu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1648-3938>

✉ – Для контактов / Corresponding author



Эффективность технологических приемов возделывания материнской линии подсолнечника

© 2025. А. С. Бушнев✉, Г. И. Орехов, И. А. Котлярова, Д. А. Курилова, Ю. В. Мамырко

ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур им. В. С. Пустовойта», г. Краснодар, Российская Федерация

В статье приведены результаты исследования по влиянию технологических приемов (норма высева семян, макро- и микроудобрения, химическая и биологическая защита растений) на рост и развитие, элементы продуктивности, поражение болезнями, всхожесть семян и качество семенного материала материнской линии подсолнечника ВК1-клп, а также на изменение качественного и количественного состава микробиоты в ризосфере подсолнечника. Исследования проводили в 2023-2024 гг. в условиях Краснодарского края на черноземах обыкновенном и выщелоченном. Болезни учитывали в фазы роста подсолнечника BBCH 51 и BBCH 85 (по международной шкале BBCH) в соответствии с общепринятыми методами фитопатологических исследований. Микологический состав образцов почвы определяли (методом последовательного почвенного разведения по А. И. Нетрусову, идентификацию микромицетов в ризосфере подсолнечника – по М. А. Литвинову и А. Я. Семенову) до посева культуры и при наступлении фазы физиологической спелости. Учеты и анализы растительных образцов выполняли согласно методике ВНИИМК. Установлено, что агротехнические приемы не оказали воздействия на микологический состав ризосферы подсолнечника, способствовали снижению поражения растений и положительно влияли на рост и продуктивность культуры. Применение удобрений и химической защиты растений от болезней способствовало снижению распространенности сухой гнили подсолнечника (*Rizopus spp.*) на 10 %, увеличению высоты растений на 8,1 см и получению высокой урожайности – 1,25 т/га. При уменьшении нормы высева с 75 до 65 тыс. всхожих семян/га отмечено существенное повышение массы 1000 семян с 53,6 до 57,3 г. Наилучшая лабораторная всхожесть семян (98,0 %) была получена при совместном использовании биологической защиты растений и микроудобрений, полевая (95,4 %) – при применении удобрений и химической защиты растений. Результаты исследования могут стать основой разработки рекомендаций по технологии возделывания материнской линии подсолнечника ВК1-клп, способствовать увеличению производства качественного семенного материала.

Ключевые слова: *Helianthus annuus* L., агротехнический прием, норма высева семян, ризосфера, удобрение, защита растений, болезни подсолнечника, урожайность, всхожесть семян

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур им. В. С. Пустовойта» (тема № 082-3-2023-0003).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов

Для цитирования: Бушнев А. С., Орехов Г. И., Котлярова И. А., Курилова Д. А., Мамырко Ю. В. Эффективность технологических приемов возделывания материнской линии подсолнечника. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(1):115–128. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.115-128>

Поступила: 03.10.2024

Принята к публикации: 11.02.2024

Опубликована онлайн: 26.02.2025

Efficiency of technological methods of cultivation of sunflower maternal line

© 2025. Aleksander S. Bushnev✉, Gennady I. Orekhov, Irina A. Kotlyarova, Dina A. Kurilova, Yulia V. Mamyrko

V. S. Pustovoit All-Russian Research Institute of Oil Crops, Krasnodar, Russian Federation

The article presents the results of research on the effect of technological methods (seeding rates, macro- and microfertilizers, chemical and biological plant protection) on the growth and development, productivity elements, disease affection, seed germination and quality of seed material of the sunflower maternal line VK1-klp, as well as on the changes in the qualitative and quantitative composition of microbiota in the rhizosphere of sunflower. The research was conducted in 2023-2024 in the conditions of the Krasnodar region on ordinary and leached chernozems. Disease recording was carried out at sunflower stages BBCH 51 and BBCH 85 (according to the international BBCH-scale) in accordance with generally accepted methods of phytopathological research. Mycological analysis of soil samples (by the method of sequential soil dilution by A. I. Netrusov, identification of micromycetes in sunflower rhizosphere by M. A. Litvinov and A. Ya. Semenov (et al.)) was carried out before sowing and at the onset of the physiological maturity stage of the crop (soil sampling in the rhizosphere). The samples were counted and analyzed according to the methodology of V. S. Pustovoit All-Russian Research Institute of Oil Crops. It was established that agrotechnical methods had no effect on the mycological composition of the sunflower rhizosphere, contributed to the decrease

of plant affection and positively influenced the growth and productivity of the crop. The application of fertilizers and chemical plant protection against diseases contributed to a 10 % decrease in the prevalence of sunflower dry rot (*Rizopus* spp.), an increase in plant height by 8.1 cm and the achievement of a high yield – 1.25 t/ha. Decreasing the seeding rate from 75 to 65 thousand pcs/ha resulted in a significant increase in the thousand-seed weight from 53.6 to 57.3 g. The best laboratory germination of seeds (98.0 %) was obtained with the combined use of biological plant protection and microfertilizers, field germination (95.4 %) – with the use of fertilizers and chemical plant protection. The results of the research can be the basis for the preparation of recommendations for increasing the production of seed material of maternal lines of sunflower with improved quality.

Keywords: sunflower (*Heliánthus ánnuus* L.), agrotechnical practice, seeding rate, rhizosphere, fertilizer, plant protection, sunflower diseases, yield, seed germination

Acknowledgments: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of V. S. Pustovoit All-Russian Research Institute of Oil Crops (theme No. 082-3-2023-0003).

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

Conflict of Interest: the authors declared no conflicts of interest.

For citation: Bushnev A. S., Orekhov G. I., Kotlyarova I. A., Kurilova D. A., Mamyрко Yu. V. Efficiency of technological methods of cultivation of sunflower maternal line. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):115–128. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.115-128>

Received: 03.10.2024

Accepted for publication: 11.02.2024

Published online: 26.02.2025

В Российской Федерации подсолнечник является наиболее востребованной сельскохозяйственной культурой пищевого, кормового и технического назначения. По данным Росстата, в 2020–2023 гг. посевная площадь под подсолнечником составляла порядка 10 млн га, а урожайность – 1,7–1,9 т/га. В 2023 г. получен рекордный валовой сбор – 17,25 млн т¹.

Краснодарский край стабильно является одним из региональных лидеров в производстве этой ценной масличной культуры, урожайность которой в 2023 г. составила 2,72 т/га, что на 45 % выше среднего значения по стране. Получению высоких показателей продуктивности подсолнечника способствуют эффективная селекционная работа, а также разработка новых технологий возделывания, применение сортовой агротехники. В ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В. С. Пустовойта» (ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК) селекция сортов и гибридов подсолнечника ведется по всем востребованным на рынке этой культуры направлениям и основывается на фундаментальных агробиологических исследованиях [1]. Это способствовало повышению в агропромышленном производстве доли отечест-

венных семян, которая на полях Краснодарского края в 2023 г. составила около 44 %².

В настоящее время учеными ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК ведется интенсивная селекционная работа по созданию конкурентоспособных гибридов и сортов подсолнечника с улучшенными характеристиками (устойчивость к заразихе (*Orobanchе cumana* Wallr.)), измененный жирно-кислотный состав, гербицидоустойчивость, скороспелость, устойчивость к болезням и др.). В результате работы селекционеров потенциальная урожайность новых гибридов превышает 4,0 т/га. Однако в производственных условиях многие высокоурожайные гибриды и сорта подсолнечника не достигают своего потенциала урожайности вследствие нарушения технологии выращивания. Так, системы обработки почвы, удобрения и защиты растений должны оптимально сочетаться и полностью соответствовать биологическим особенностям культуры, месту подсолнечника в севообороте, конкретным почвенно-климатическим условиям. Несоблюдение принципа возврата подсолнечника через 8–10 лет приводит к массовому поражению растений болезнями и заразихой. Нарушение научных принципов обработки почвы способствует снижению урожайности культуры на 20–30 %^{3, 4}.

¹Посевные площади сельскохозяйственных культур в хозяйствах всех категорий Российской Федерации, тыс. гектаров (Росстат). [Электронный ресурс]. URL: <https://zerno.ru/node/25267> (дата обращения 04.06. 2024).

²Названы ТОП-10 регионов РФ по площадям под подсолнечником в 2024 году. [Электронный ресурс]. URL: <https://glavagronom.ru/news/nazvany-top-10-regionov-rf-po-ploshchadyam-pod-podsolnechnikom-v-2024-godu> (дата обращения 03.04.2024).

³Прибыльный подсолнечник: советы эксперта по выращиванию культуры. [Электронный ресурс]. URL: <https://glavagronom.ru/articles/pribylnyy-podsolnechnik-sovety-eksperta-po-vyrashchivaniyu-kultury> (дата обращения 22.05.2024).

⁴Топовые агроприемы возделывания подсолнечника и новые сорта ВНИИМК. [Электронный ресурс]. URL: <https://glavagronom.ru/articles/topovye-agropriemy-dlya-vysokih-urozhaev-podsolnechnika> (дата обращения 22.05.2023).

В современных условиях требуется разработка агротехнических мероприятий, способных обеспечить высокую эффективность производства семян подсолнечника. Практика показывает, что от применяемой технологии выращивания зависит величина урожайности и качество семян. Большое влияние на продуктивность и элементы структуры урожая оказывают такие агроприемы, как срок посева и норма высева семян [2, 3]. Исследованиями выявлены различия в количестве патогенных грибов родов *Fusarium*, *Alternaria* и *Rhizopus*, находящихся в ризосфере подсолнечника, посеянного в разные сроки и с разными нормами высева, а также связь между наличием этих патогенов в прикорневой зоне и заболеваемостью растений фузариозом, альтернариозом и сухой гнилью [4]. Установлено положительное влияние на элементы структуры урожая подсолнечника микробных препаратов, достоверно повышающих его урожайность и сбор масла [5], доказана эффективность применения гербицидов в посевах подсолнечника и влияние их на видовой состав сорняков [6]. Выявлено влияние органических и минеральных удобрений [7, 8] на продуктивность посевов подсолнечника. Установлено, что использование микроудобрений повышает уровень урожайности культуры, в зависимости от фона минерального питания, на 0,26–0,59 т/га [9]. Определен минимальный срок возврата подсолнечника в севообороте на прежнее место, способствующий снижению или уничтожению запаса почвенных патогенов: возбудителей белой и серой гнилей, ложной мучнистой росы, фузариоза [10]. Исследование способов применения средств химической защиты подсолнечника от комплекса вредителей всходов выявило их высокую эффективность, сохранив урожай и получив прибавку от 0,21 до 0,34 т/га [11]. Установлено, что предпосевное внесение дефеката (3,9 и 5,9 т/га) позволило значительно снизить численность проволочников и получить прибавку урожая подсолнечника в размере 0,86–0,87 т/га [12]. Однако чрезмерное использование удобрений и пестицидов не только загрязняет почву, но и ухудшает ее качество, снижает биоразнообразие почвенного профиля [13]. Рентабельность производства подсолнечника во многом определяют предшественники, срок посева и уровень минерального питания [14].

Для получения урожая высокого качества разрабатываемая технология возделывания должна учитывать влияние применяемых агроприемов на ризосферную микрофлору подсолнечника, так как микроорганизмы, находя-

щиеся в корневой зоне, играют огромную роль во всех процессах, отвечающих за формирование почвенного плодородия, рост и развитие культурных растений. При этом элементы технологии возделывания отдельно или в сочетании друг с другом оказывают непосредственное влияние на состав микробиоты почвы [15, 16]. Результаты исследования микробиоты ризосферы подсолнечника могут стать основой при создании биопрепаратов для использования в сельском хозяйстве, способствующих повышению плодородия почвы и служащих в качестве средств защиты растений от инфекций [17].

Цель исследования – изучение степени влияния технологических приемов возделывания (норма высева семян, макро- и микроудобрения, средства химической и биологической защиты растений) на особенности роста и развития растений линии подсолнечника ВК1-клп, элементы продуктивности и качество семенного материала, распространенность основных болезней, изменение качественного и количественного состава микробиоты в ризосфере подсолнечника.

Научная новизна – впервые исследована реакция линии подсолнечника ВК1-клп на технологические приемы возделывания по комплексу показателей, включая изменения количественного и качественного состава ризосферной микробиоты.

Материал и методы. Исследования выполняли в ОСХ «Урупское» Новокубанского района Краснодарского края на черноземе обыкновенном (участок размножения подсолнечника, 2023 г.) и в ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК на черноземе выщелоченном (экспериментальный севооборот агротехнологического отдела, 2024 г.). Предшественник – озимая пшеница.

Объект изучения – линия подсолнечника ВК1-клп, являющаяся материнской формой нового гибрида Клип (среднеспелый, интенсивного типа, устойчив к имидазолиновым гербицидам, потенциальная урожайность достигает 4,5 т/га, масличность семян – 50 %) селекции ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК.

В исследованиях были использованы технологии возделывания подсолнечника, рекомендованные производителями удобрений и средств защиты растений:

- обычная – с использованием припосевного внесения $N_{10}P_{26}K_{26}$ и некорневых обработок посевов химическими пестицидами и микроудобрениями производства АО «Щелково Агрохим» (фактор А, варианты № 2–4);

- биологизированная – с применением биологических пестицидов и микроудобрений производства ООО «Биотехагро» (фактор А, вариант № 5).

Опыт двухфакторный (место проведения исследований ОСХ «Урупское», 2023 г.):

Фактор А – агротехнический прием:

1. Контроль (без удобрений и средств защиты растений от болезней).

2. Удобрение ($N_{10}P_{26}K_{26}$ при посеве и две некорневые подкормки микроудобрениями).

3. Удобрение ($N_{10}P_{26}K_{26}$ при посеве, две некорневые подкормки микроудобрениями) и химическая защита растений от болезней.

4. Химическая защита растений от болезней.

5. Биологическая защита от болезней и две некорневые подкормки микроудобрениями.

Фактор В – норма высева: 65 и 75 тыс. всхожих семян/га.

Для обработки посевов в вариантах № 2–4 применяли микроудобрения Биостим масляный, Ж (1,0 л/га), Ультрамаг бор, Ж (0,5 л/га) и фунгициды Титул Трио, ККР (0,5 л/га) и Мистерия, МЭ (1,25 л/га), в варианте № 5 – микроудобрение Гелиос цинк, Ж (1,0 л/га), биофунгицид БФТИМ, Ж (3,0 л/га).

В фазе бутонизации и после цветения подсолнечника в вариантах № 1–4 проведена обработка растений от насекомых-вредителей (хлопковая совка (*Helicoverpa armigera*)) инсектицидом Пирелли, КЭ (1,0 л/га), в варианте № 5 – биологическим инсектицидом Инсетим, Ж (3,0 л/га). За 15 дней до проведения уборки опытный участок обработали десикантом Тонгара, ВР (2,0 л/га).

Опыт полевой, повторность двукратная. Общая площадь делянки составляет 0,224 га, учетная – 0,168 га.

Исследования выполняли в соответствии с методиками проведения полевых агротех-

нических опытов с масличными культурами. Фенологические наблюдения осуществляли в соответствии с международной системой определения фенологических фаз (ВВСН) для подсолнечника⁵. Учет болезней проводили в фазы ВВСН 51 и ВВСН 85 в соответствии с общепринятыми методами фитопатологических исследований^{6, 7}. Анализ микологического фона проводили до посева культуры. Отбор почвенных проб в ризосфере подсолнечника выполняли при наступлении фазы физиологической спелости культуры (ВВСН 61-85) в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-83⁸ и методами почвенной микробиологии. Микологический анализ образцов почвы проводили методом последовательного почвенного разведения по А. И. Нетрусову⁹. Микологический анализ почвенных образцов и идентификацию всех культур микромицетов до рода проводили в ФГБНУ «Федеральный научный центр биологической защиты растений» (ФГБНУ ФНЦ БЗР) по общепринятым методикам^{10, 11}. Для изучения лабораторной всхожести семян использовали чистые выполненные семена материнской формы. Исследование полевой всхожести выращенных на участке размножения семян ВК1-клп проводили в 2024 г. на центральной экспериментальной базе ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК (г. Краснодар) по представленной выше схеме опыта. Семена перед посевом обрабатывали от болезней и вредителей подсолнечника комплексом препаратов (Круйзер, КС – 10 л/т; Апрон Голд, ВЭ – 3 л/т; Максим, КС – 5 л/т). При подсчете проростков в поле учитывали количество всходов, выраженных в процентах к количеству высеванных всхожих семян подсолнечника. Учеты и анализы растительных образцов выполняли согласно методике ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК¹². Экспериментальные данные обрабатывали методом дисперсионного анализа в изложении Б. А. Доспехова¹³.

⁵Фазы роста и этапы органогенеза подсолнечника. [Электронный ресурс].

URL: <https://rosng.ru/post/content-fazy-rosta-i-etapy-organogeneza-podsolnechnika> (дата обращения: 21.12.2024).

⁶Лукомец В. М., Котлярова И. А., Терещенко Г. А. Атлас болезней подсолнечника. Краснодар: ФГБНУ ВНИИМК, Просвещение-Юг, 2015. 67 с.

⁷Чумаков А. Е., Минкевич И. И., Власов Ю. И., Гаврилова Е. А. Основные методы фитопатологических исследований. М.: Колос, 1974. 191 с.

⁸ГОСТ 17.4.3.01-83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору почв. М.: Стандартинформ, 2004. 3 с. URL: https://rosngs.ru/file/gost/13/080/gost_17.4.3.01-83.pdf

⁹Нетрусов А. И., Котова И. Б. Общая микробиология: учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 288 с. URL: <https://library.tou.edu.kz/fulltext/buuk/b3190.pdf>

¹⁰Литвинов М. А. Определитель микроскопических почвенных грибов. Наука, 1967. 304 с.

¹¹Семенов А. Я., Абрамова Л. П., Хохряков М. К. Определитель паразитных грибов на плодах и семенах культурных растений. М.: Колос, 1980. 302 с.

¹²Методика проведения полевых агротехнических опытов с масличными культурами. Под общ. ред. В. М. Лукомца. Второе изд. перераб. и доп. Краснодар, 2010. С. 238–245.

¹³Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

Результаты и обсуждения. Начальный период вегетации подсолнечника (прорастание семян, появление всходов и развитие розетки листьев) в 2023 г. проходил в условиях значительного превышения количества выпавших осадков над среднесуточными значениями. Так, в мае и июне выпало 122 и 116 мм, что в 2,0 и 1,5 раза соответственно превышало норму. В июле количество осадков (42 мм) выпало в пределах нормы (54 мм), в период налива и созревания семян (август и сентябрь)

– 9 и 7 мм, что составило 18,4 и 17,1 % от среднесуточных значений. Среднесуточная температура воздуха в мае была на 0,8 °C ниже среднесуточных значений, в июне, июле, августе и сентябре – выше нормы на 1,0; 0,4; 4,2 и 3,0 °C соответственно (табл. 1). Таким образом, начальный период роста и развития подсолнечника проходил в условиях избыточного увлажнения, а созревание растений – при недостатке влаги и повышенных среднесуточных температурах воздуха.

**Таблица 1 – Погодные условия вегетационного периода подсолнечника (метеопост г. Армавир, Краснодарский край, 2023 г.) /
Table 1 – Weather conditions of the growing season of sunflower (weather station Armavir, Krasnodar region, 2023)**

Показатель / Indicator	Месяц / Month				
	май / may	июнь / june	июль / july	август / august	сентябрь / september
Температура воздуха, °C / Air temperature, °C					
Средняя многолетняя / Long-term average annual	16,8	20,2	23,1	22,1	16,9
Значения текущего года / Current year values	16,0	21,2	23,5	26,3	19,9
Сумма среднесуточных значений температуры воздуха, °C / Sum of daily average air temperature values, °C					
Средняя многолетняя / Long-term average annual	520,8	606,0	716,1	685,1	507,0
Значения текущего года / Current year values	496,0	636,0	728,5	815,3	597,0
Осадки, мм / Precipitation, mm					
Средняя многолетняя / Long-term average annual	60	77	54	49	41
Значения текущего года / Current year values	122	116	42	9	7
ГТК по Селянинову / Hydrotherml coefficient by Selyaninov					
Средний многолетний / Long-term average annual	1,15	1,27	0,75	0,72	0,81
Значения текущего года / Current year values	2,46	1,82	0,58	0,11	0,14

Посев проводили 5 мая, стадия посев-всходы (ВВСН 00-09) в среднем проходила 12 суток. Продолжительность межфазных периодов вегетации культуры составила: всходы-бутонизация (ВВСН 10-51) – 34 суток, бутонизация-цветение (ВВСН 51-61) – 26 суток, цветение-физиологическая спелость (ВВСН 61-85) – 30 суток, всходы-физиологическая спелость – 90 суток. Полная спелость (ВВСН 89, влажность семян 15 %) наступила через 116 суток – 30-31 августа. Следует отметить, что агро-

технические приемы не оказали влияния на продолжительность этих периодов.

В результате проведения фитопатологической оценки в вариантах опыта на растениях подсолнечника были выявлены следующие болезни: ложная мучнистая роса (*Plasmopara halstedii* (Farlow) Berlese & de Toni), сухая гниль корзинок (*Rhizopus spp.*), фомоз (*Leptosphaeria lindquistii* Frezzi), фузариоз (*Fusarium* Lk. et Fr.), альтернариоз (*Alternaria* Nees). Среди бактериоза преобладала бурая

угловатая пятнистость (*Pseudomonas syringae* pv. *helianthi* (Kawamura, 1934)) и значительно реже встречался бактериальный ожог (*Xanthomonas arboricola* (Smith) (Vauterin et al.)). В фазе физиологической спелости подсол-

нечника распространенность болезней, в зависимости от варианта опыта, была в пределах: 26–46 % – бактериоз; 13–33 % – фузариозная корневая гниль; до 20 % – сухая гниль; 1–5 % – фомоз; 22–36 % – альтернариоз (табл. 2).

Таблица 2 – Поражение болезнями растений материнской линии подсолнечника VK1-клп в зависимости от технологических приемов возделывания (ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК, ОСХ «Урупское», 2023 г.) /
Table 2 – Disease affection of sunflower plants of maternal line VK1-klp depending on technological methods of cultivation (V. S. Pustovoi All-Russian Research Institute of Oil Crops, farm "Urupskoye", 2023)

Вариант / Variant		Распространенность болезней в фазу развития, % / Disease prevalence in the development stage, %							
агротехнический прием (фактор A) / agrotechnical practice (factor A)	норма высева, тыс. семян/га (фактор B) / seeding rate of thousand seeds/ha (factor B)	бутонизация / budding		физиологическая спелость / physiological maturity					
		ложная мучнистая роса / downy mildew	бактериоз / bacterial blight	корневая гниль / root rot		сухая гниль / dry rot	бактериоз / bacterial blight	фомоз / phoma rot	альтернариоз / alternaria blight
				фузариоз / fusarium blight	бактерии / bacteria				
1. Контроль / Control	65	7	3	13	3	16	46	5	36
	75	11	6	22	3	19	26	4	22
2. Удобрение / Fertilizer	65	8	3	19	6	16	45	4	36
	75	5	3	21	7	16	36	2	31
3. Удобрение + химическая защита растений / Fertilizer + chemical plant protection	65	4	2	25	4	6	37	1	35
	75	6	2	33	4	12	34	3	31
4. Химическая защита растений / Chemical plant protection	65	4	0	25	2	5	35	2	35
	75	4	5	30	2	20	33	2	25
5. Биологическая защита растений + микроудобрения / Biological plant protection + microfertilizers	65	8	1	31	0	14	37	2	28
	75	5	2	32	2	19	30	4	24

В погодных условиях 2023 года проявление болезней на растениях подсолнечника было слабым, поэтому вывод об эффективности применения агротехнических приемов сделать сложно. Различия в вариантах опыта незначительные. Однако наблюдалась тенденция к снижению распространенности сухой гнили в вариантах с применением химической защиты растений и удобрений, что подтверждается результатами определения биологической эффективности технологических приемов (табл. 3).

Следует отметить, что применение удобрений на подсолнечнике не оказало значительного влияния на распространенность возбу-

дителей болезней. Однако при увеличении нормы высева до 75 тыс. всхожих семян/га в четвертом и пятом вариантах биологическую эффективность против поражения корней фузариозом, корзинок сухой гнилью, растений бактериозом и альтернариозом получили низкую.

На основании микробиологического анализа ризосферной почвы, отобранной в фазе физиологической спелости подсолнечника, выявлено, что патогенные грибы представлены в основном *Fusarium spp.*, которые способны вызывать корневые гнили, трахеомикозное увядание, пятнистость. В исходном образце почвы, отобранном перед посевом культуры,

количество фузариев составило 10,9 % (табл. 4). В ризосферной почве в вариантах с применением удобрений и защиты растений как химической, так и биологической количество *Fusarium spp.* отмечено на уровне исходного значения (9,9–17,6 %), тогда как в контроле – почти в 2 раза меньше (6,5 %). Вероятной причиной такого явления может служить некоторое угнетение бактериальных антагонистов грибов рода *Fusarium* при прямом внесении

агрохимикатов в почву [18]. Данный вопрос требует дальнейшего изучения.

Также из представителей патогенной микофлоры в образцах ризосферной почвы в вариантах с применением химической и биологической защиты растений выявлены единичные колонии возбудителя сухой гнили подсолнечника (*Rizopus spp.*) – 0,8 и 1,4 % соответственно (табл. 4).

Таблица 3 – Биологическая эффективность технологических приемов при возделывании материнской линии подсолнечника ВК1-клп (ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК, ОСХ «Урупское», 2023 г.) /

Table 3 – Biological efficiency of technological methods in cultivation of sunflower maternal line VK1-klp (V. S. Pustovoi All-Russian Research Institute of Oil Crops, farm "Urupskeye", 2023)

Вариант / Variant		Биологическая эффективность, % / Biological efficiency, %					
агротехнический прием (фактор А) / agrotechnical practice (factor A)	норма высева, тыс. семян/га (фактор В) / seeding rate of thousand seeds/ha (factor B)	ложная мучнистая роса / downy mildew	фузариозная корневая гниль / <i>Fusarium</i> root rot	сухая гниль / dry rot	бактериоз / bacterial blight	альтернариоз / alternaria blight	фомоз / phoma rot
1. Контроль / Control	65	7*	13*	16*	46*	36*	5*
	75	11*	22*	19*	26*	22*	4*
2. Удобрение / Fertilizer	65	0	0	0	2	0	20
	75	29	5	16	0	0	50
3. Удобрение + химическая защита растений / Fertilizer + chemical plant protection	65	43	0	63	20	3	80
	75	45	0	37	0	25	0
4. Химическая защита растений / Chemical plant protection	65	43	0	69	24	3	60
	75	64	0	0	0	0	50
5. Биологическая защита растений + микроудобрения / Biological plant protection + microfertilizers	65	0	0	13	20	22	60
	75	55	0	0	0	0	0

*Поражено в контроле, % / *Affected in control, %

Агротехнические приемы с химической защитой растений (третий и четвертый варианты) способствовали существенному увеличению высоты растений до 137,9–138,7 см по сравнению с контролем – 130,6 см. В среднем по опыту при увеличении нормы высева семян с 65 до 75 тыс/га отмечен достоверный рост

высоты растений со 132,9 до 138,4 см соответственно, и в наибольшей степени (на 13,1 см) – во втором варианте (удобрение), где были самые высокие растения – 143,9 см. Следует отметить, что варьирование данного признака слабое и не превышало 6,0 % (табл. 5).

Таблица 4 – Количество микроорганизмов в 1 г абсолютно сухой почвы в ризосфере материнской линии подсолнечника ВК1-кп в зависимости от агротехнического приема в среднем по нормам высева семян (ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК, ОСХ «Урупское», 2023 г.) /

Table 4 – Number of microorganisms in 1 g of absolutely dry soil in the rhizosphere of the sunflower maternal line VK1-kp depending on agrotechnical practice on average at seeding rates (V. S. Pustovoit All-Russian Research Institute of Oil Crops, farm "Urupskoye", 2023)

Микроорганизмы / Microorganisms	Количество микроорганизмов в пробе почвы, % / Number of microorganisms in soil sample, %					
	до посева / before sowing	в фазе физиологической спелости подсолнечника / at the stage of physiological maturity of sunflower				
		агротехнический прием / agrotechnical practice				
		контроль / control	удобрение /fertilizer	удобрение + химическая защита растений / fertilizer + chemical plant protection	химическая защита растений / chemical plant protection	биологическая защита растений + микроудобрения / biological plant protection + microfertilizers
Патогенные / Pathogenic						
<i>Fusarium spp.</i>	10,9	6,5	8,8	17,6	9,9	12,2
<i>Verticillium spp.</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Rizopus spp.</i>	0	0	0	0	0,8	1,4
<i>Alternaria spp.</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Sclerotium bataticola</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Phoma macdonaldii</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Verticillium dahliae</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Botrytis cinerea</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Cladosporium spp.</i>	0	0	0	1,3	0	0
Сапрофитные / Saprophytic						
<i>Penicillium spp.</i>	46,1	58,7	58,8	47,3	58,8	60,8
<i>Aspergillus spp.</i>	39,4	26,4	27,6	25,7	20,6	19,6
<i>Mucor spp.</i>	0	0	0	0	0	0
<i>Trichoderma spp.</i>	3,6	8,4	4,8	8,1	9,9	6,1
<i>Trichothecium spp.</i>	0	0	0	0	0	0

Изучаемые агротехнические приемы весомого влияния на диаметр корзинок подсолнечника не оказали, в то время как увеличение нормы высева с 65 до 75 тыс. семян/га способствовало его снижению – с 17,1 до 16,5 см, в наибольшей степени это наблюдали в третьем варианте, где разница составила 1,8 см. Варьирование признака от слабого (9,7 %) до среднего (12,0 %).

Наибольшая направленность действия изучаемых факторов на продуктивность культуры отмечена в третьем (удобрение и химическая защита растений от болезней) и втором (удобрение) вариантах, где применяли удобрения, при этом урожайность в среднем по нормам высева получена на уровне 1,25 и 1,18 т/га с превышением контроля на 0,12 и 0,05 т/га соответственно (табл. 6).

Таблица 5 – Влияние агротехнических приемов и норм высева семян на высоту растений и диаметр корзинок материнской линии подсолнечника VK1-клп (ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК, ОСХ «Урупское», 2023 г.) /

Table 5 – Effect of agrotechnical practices and seeding rates on the plant height and head diameter of plants of sunflower maternal line VK1-klp (V. S. Pustovoi All-Russian Research Institute of Oil Crops, farm "Urupskoje", 2023)

Вариант / Variant		Высота растений, см / Plant height, cm			Диаметр корзинки, см / Head diameter, cm		
агротехнический прием (фактор A) / agrotechnical practice (factor A)	норма высева, тыс. семян/га (фактор B) / seeding rate of thousand seeds/ha (factor B)	среднее по / average by			среднее по / average by		
		вариантам / variants	фактору A / factor A	фактору B / factor B	вариантам / variants	фактору A / factor A	фактору B / factor B
1. Контроль / Control	65	$\frac{130,3^*}{5,5}$	$\frac{130,6}{4,9}$	-	$\frac{16,3}{10,0}$	$\frac{16,7}{10,4}$	-
	75	$\frac{130,8}{4,3}$			$\frac{17,0}{10,7}$		
2. Удобрение / Fertilizer	65	$\frac{126,8}{7,0}$	$\frac{135,4}{6,0}$	-	$\frac{16,9}{9,7}$	$\frac{16,7}{10,1}$	-
	75	$\frac{143,9}{5,0}$			$\frac{16,4}{10,5}$		
3. Удобрение + химическая защита растений / Fertilizer + chemical plant protection	65	$\frac{137,6}{6,4}$	$\frac{138,7}{5,4}$	-	$\frac{17,8}{10,4}$	$\frac{16,9}{11,1}$	-
	75	$\frac{139,8}{4,3}$			$\frac{16,0}{11,7}$		
4. Химическая защита растений / Chemical plant protection	65	$\frac{135,5}{5,9}$	$\frac{137,9}{5,4}$	-	$\frac{17,3}{10,9}$	$\frac{16,8}{11,5}$	-
	75	$\frac{140,2}{4,9}$			$\frac{16,2}{12,0}$		
5. Биологическая защита растений + микроудобрения / Biological plant protection + microfertilizers	65	$\frac{134,5}{3,4}$	$\frac{136,0}{4,7}$	-	$\frac{17,2}{10,6}$	$\frac{17,1}{11,1}$	-
	75	$\frac{137,4}{5,9}$			$\frac{16,9}{11,5}$		
Среднее по фактору B / Average by factor B	65	-	-	$\frac{132,9}{5,6}$	-	-	$\frac{17,1}{10,3}$
	75	-	-	$\frac{138,4}{4,9}$	-	-	$\frac{16,5}{11,3}$
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	-	7,7	5,5	3,5	1,5	1,1	0,7

* Числитель – высота растений, знаменатель – коэффициент вариации, % (n = 75) /

* Numerator – plant height, denominator – coefficient of variation, % (n = 75)

Увеличение нормы высева с 65 до 75 тыс. семян/га способствовало существенному снижению массы 1000 семян в первом и третьем вариантах. Наиболее крупные семена получены в первом (58,0 г), третьем (58,3 г) и четвертом (58,2 г) вариантах при норме высева 65 тыс/га (табл. 7).

Качество семенного материала оценивали по лабораторной и полевой всхожести

семян, а также фитопатологической экспертизе. Установлено, что лабораторная всхожесть семян соответствовала требованиям ГОСТ Р 52325-2005¹⁴ и превышала 85 %, причем самые большие ее значения получены в пятом варианте при совместном использовании биологической защиты растений и микроудобрений – 98,0 % (табл. 8).

¹⁴ГОСТ Р 52325-2005. Семена сельскохозяйственных растений. Сортовые и посевные качества. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2009. 22 с.

URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293853/4293853613.pdf>

**ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ: ЗАЩИТА РАСТЕНИЙ /
ORIGINAL SCIENTIFIC ARTICLES: PLANT PROTECTION**

Таблица 6 – Влияние агротехнических приемов и норм высева семян на урожайность материнской линии подсолнечника ВК1-клп (ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК, ОСХ «Урупское», 2023 г.) /

Table 6 – Effect of agrotechnical practices and seeding rates on the yield of sunflower maternal line VK1-klp (V. S. Pustovoi All-Russian Research Institute of Oil Crops, farm “Urupskoye”, 2023)

Вариант / Variant		Урожайность, т/га / Yield, t/ha		
агротехнический прием (фактор A) / agrotechnical practice (factor A)	норма высева, тыс. семян/га (фактор B) / seeding rate of thousand seeds/ha (factor B)	среднее по / average by		
		варианты / variants	фактору A / factor A	фактору B / factor B
1. Контроль / Control	65	1,13	1,13	-
	75	1,13		
2. Удобрение / Fertilizer	65	1,17	1,18	
	75	1,20		
3. Удобрение + химическая защита растений / Fertilizer + chemical plant protection	65	1,31	1,25	
	75	1,20		
4. Химическая защита растений / Chemical plant protection	65	1,16	1,14	
	75	1,12		
5. Биологическая защита растений + микроудобрения / Biological plant protection + microfertilizers	65	1,03	1,06	-
	75	1,10		-
Среднее по фактору B / Average by factor B	65	-	-	1,16
	75	-	-	1,15
НСР ₀₅ / LSD ₀₅	-	0,19	0,14	0,09

Таблица 7 – Влияние агротехнических приемов и нормы высева на массу 1000 семян материнской линии подсолнечника ВК1-клп (ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК, ОСХ «Урупское», 2023 г.) /

Table 7 – Effect of agrotechnical practices and seeding rates on the thousand-seed weight of sunflower maternal line VK1-klp (V. S. Pustovoi All-Russian Research Institute of Oil Crops, farm "Urupskoye", 2023)

Вариант / Variant		Масса 1000 семян, г / Thousand-seed weight, g		
агротехнический прием (фактор A) / agrotechnical practice (factor A)	норма высева, тыс. семян/га (фактор B) / seeding rate of thousand seeds/ha (factor B)	среднее по / average by		
		варианты / variants	факторы A / factor A	факторы B / factor B
1. Контроль / Control	65	58,0	55,8	-
	75	53,6		
2. Удобрение / Fertilizer	65	55,7	54,8	
	75	53,9		
3. Удобрение + химическая защита растений / Fertilizer + chemical plant protection	65	58,3	54,4	
	75	50,6		
4. Химическая защита растений / Chemical plant protection	65	58,2	56,5	
	75	54,7		
5. Биологическая защита растений + микроудобрения / Biological plant protection + microfertilizers	65	56,4	55,9	-
	75	55,3		-
Среднее по фактору B / Average by factor B	65	-	-	57,3
	75	-	-	53,6
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	-	3,5	2,4	1,6

Таблица 8 – Влияние агротехнических приемов и норм высева на лабораторную и полевую всхожесть семян линии подсолнечника ВК1-клп (ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК, г. Краснодар, 2024 г.) /

Table 8 – Effect of agrotechnical practices and seeding rates on the laboratory and field germination of sunflower line VK1-klp (V. S. Pustovoit All-Russian Research Institute of Oil Crops, Krasnodar, 2024)

Вариант / Variant		Лабораторная всхожесть, % / Laboratory germination, %		Полевая всхожесть, % / Field germination, %				
агротехнический прием (фактор А) / agrotechnical practice (factor A)	норма высева, тыс. семян/га (фактор В) / seeding rate of thousand seeds/ha (factor B)	среднее по / average by						
		варианты / variants	факторы А / factor A	факторы В / factor B	варианты / variants	факторы А / factor A	факторы В / factor B	
1. Контроль / Control	65	88	90,5	-	93,7	93,5	-	
	75	93			93,3			
2. Удобрение / Fertilizer	65	98	94,5		94,7	94,0		
	75	91			93,3			
3. Удобрение + химическая защита растений / Fertilizer + chemical plant protection	65	92	95,0		95,3	95,4		
	75	98			95,5			
4. Химическая защита растений / Chemical plant protection	65	91	89,5		96,0	93,5		
	75	88			91,0			
5. Биологическая защита растений + микроудобрения / Biological plant protection + microfertilizers	65	96	98,0	-	93,7	91,7	-	
	75	100		-	89,7		-	
Среднее по фактору В / Average by factor B	65	-	-	93,0	-	-	94,7	
	75	-	-	94,0	-	-	92,6	
НСР ₀₅ / LSD ₀₅		-	12,6	8,9	5,6	6,3	4,5	2,8

На основании фитопатологической экспертизы выявлено, что в пятом варианте (биологическая защита растений + микроудобрения) все проросшие семена были здоровыми, в третьем варианте (удобрение + химическая защита растений) отмечено наименьшее количество больных (не более 1 %), в четвертом (химическая защита растений) – определено их наибольшее число (12 %): 3 % – среди проросших; 9 % – среди невсхожих. Возбудитель сухой гнили являлся основным видом семенной инфекции.

Предпосевная обработка семян инсекто-фунгицидной композицией (Круйзер + Апрон Голд + Максим) способствовала снижению их инфекционного фона и получению высоких значений полевой всхожести: во всех вариантах опыта она превышала 85 %, самой высокой отмечена в третьем варианте (удобрение + химическая защита растений) – 95,4 %, однако разница в значениях показателя между вариантами опыта незначительная.

Закключение. Технологические приемы (макро- и микроудобрения, химическая и биологическая защита растений, норма высева семян), используемые при возделывании материнской линии подсолнечника ВК1-клп на черноземе обыкновенном Западного Предкавказья, в условиях 2023 г. на распространенность болезней существенно не повлияли, но оказали положительное воздействие на рост и урожайность культуры. Приемы возделывания материнской линии ВК1-клп не изменили качественный и количественный состав микробиоты в ризосфере подсолнечника. Совместное использование удобрения и химической защиты растений способствовало получению самой высокой урожайности – 1,25 т/га. Повышение нормы высева с 65 до 75 тыс. семян/га не приводило к увеличению урожайности культуры, но способствовало существенному снижению массы 1000 семян с 57,3 до 53,6 г. Низкий инфекционный фон полученных семян обеспечил их высокие посевные свойства, соответствующие требованиям действующих стандартов:

совместное использование биологической защиты растений и микроудобрений способствовало получению здоровых семян и высокой лабораторной всхожести (98,0 %), а совместное применение удобрений и химической защиты растений – высокой полевой всхожести (95,4 %).

Результаты исследования могут стать основой при разработке рекомендаций по технологии возделывания материнской линии подсолнечника ВК1-клп, способствовать увеличению производства семенного материала повышенного качества.

Список литературы

1. Лукомец В. М., Трунова М. В., Демури Я. Н. Современные тренды селекционно-генетического улучшения сортов и гибридов подсолнечника во ВНИИМК. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2021;25(4):388–393. DOI: <https://doi.org/10.18699/VJ21.042> EDN: USKUKC
2. Бушнев А. С., Мамырко Ю. В., Подлесный С. П., Орехов Г. И., Павелко И. А. Влияние сроков и норм высева семян на продуктивность гибридов подсолнечника. Сахарная свекла. 2023;(8):31. DOI: <https://doi.org/10.25802/SB.2023.63.90.005> EDN: GLWJRV
3. Тишков Н. М., Тильба В. А., Махонин В. Л., Шкарупа М. В. Формирование продуктивности материнских линий гибридов подсолнечника при выращивании с разной густотой стояния растений. Масличные культуры. 2022;(1(189)):45–53. DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2022-1-189-45-53> EDN: GUXHNZ
4. Орехов Г. И., Бушнев А. С., Котлярова И. А., Курилова Д. А. Эффективность агроприемов в агробиопеце подсолнечника на черноземе выщелоченном Западного Предкавказья. Масличные культуры. 2024;(3(199)):25–39. DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2024-3-199-25-39> EDN: WMBIKG
5. Тишков Н. М., Тильба В. А., Махонин В. Л., Якубовская А. И., Каменева И. А., Шкарупа М. В. Эффективность микробных препаратов полифункционального действия при возделывании подсолнечника на чернозёме выщелоченном. Таврический вестник аграрной науки. 2022;(3(31)):188–197. Режим доступа: <https://elibrary.ru/sycqow> EDN: SYCQOW
6. Авдеев А. П., Тишкин Д. П. Влияние гербицидов на засоренность посевов и продуктивность подсолнечника. Ресурсосбережение и адаптивность в технологиях возделывания сельскохозяйственных культур и переработки продукции растениеводства: мат-лы междунаро. научн.-практ. конф. Персиановский: Донской ГАУ, 2020. С. 55–58. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42695280> EDN: UNRBNY
7. Mohammadi K., Heidari G., Javaheri M., Rokhzadi A., Nezhad M. T. K., Sohrabi Y., Talebi R. Fertilization affects the agronomic traits of high oleic sunflower hybrid in different tillage systems. Industrial Crops and Products. 2013;44:446–451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.09.028>
8. Sahoo P., Brar A. S., Sharma S. Effect of methods of irrigation and sulphur nutrition on seed yield, economic and bio-physical water productivity of two sunflowers (*Helianthus annuus* L.) hybrids. Agricultural Water Management. 2018;206:158–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.009>
9. Аль-Аттафи М. К. Р., Есаулко А. Н., Котова А. С. Влияние макро и микро - удобрений на планируемую урожайность и продуктивность маслосемян подсолнечника на черноземе выщелоченном. International Agricultural Journal. 2024;67(6):33. DOI: https://doi.org/10.55186/25880209_2024_8_6_33 EDN: NGDIZU
10. Лукомец В. М., Семеренко С. А., Пивень В. Т., Бушнева Н. А. Влияние основных агротехнических приемов на развитие болезней и сорняков в посевах подсолнечника. Защита и карантин растений. 2020;(10):30–33. DOI: https://doi.org/10.47528/1026-8634_2020_10_30 EDN: NSLXCY
11. Хатнянский В. И., Децына А. А., Семеренко С. А. Эффективная защита всходов крупноплодного подсолнечника кондитерского направления от вредителей. Защита и карантин растений. 2021;(6):24–25. DOI: https://doi.org/10.47528/1026-8634_2021_6_24 EDN: ODXUVU
12. Семеренко С. А., Бушнева Н. А. Влияние применения дефеката на вредоносность проволочников и продуктивность подсолнечника в Краснодарском крае. Масличные культуры. 2023;(4(196)):62–67. DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2023-4-196-62-67> EDN: TPGLZO
13. Семеренко С. А., Бушнева Н. А. Влияние пестицидов на почвенную микрофлору (обзор). Масличные культуры. 2024;(4(200)):132–140. DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2024-4-200-132-140> EDN: RREMVE
14. Кагермазова А. Ч., Иванова З. А., Нагудова Ф. Х. Влияние различных приемов технологии возделывания подсолнечника на экономическую эффективность производства. Современные проблемы науки и образования. 2014;(5):751. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22567165> EDN: SZVTUV
15. Турусов В. И., Гармашов В. М. Влияние способов обработки на плодородие чернозема обыкновенного и урожайность ячменя в условиях юго-востока ЦЧР. Достижения науки и техники АПК. 2019;33(12):20–25. DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-11204> EDN: NALCRG
16. Бушнев А. С., Семеренко С. А., Курилова Д. А., Мамырко Ю. В., Котлярова И. А., Павелко И. А. Влияние инкрустации семян пестицидами на ризосферную микрофлору подсолнечника. Биологическая защита растений – основа стабилизации агроэкосистем: мат-лы Междунаро. научн.-практ. конф. Краснодар: ООО «Эдви», 2024. С. 65–70. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=74497096> EDN: DQPNWQ

17. Домрачева Л. И., Стариков П. А., Ковина А. Л., Ашихмина Т. Я. Использование микромицетов рода *trichoderma* и консорциумов на их основе в агробиотехнологии (обзор). Теоретическая и прикладная экология. 2024;(1):6–18. DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2024-1-006-018> EDN: JAUPNA

18. Енкина О. В. Итоги исследований по микробиологии почв. История научных исследований во ВНИИМКе за 90 лет. Сост. Н. И. Бочкарев, С. Д. Крохмаль. 2-е изд., исправ. и доп. Краснодар: Редакция журнала "Сельские зори", 2003. С. 239–243.

References

1. Lukomets V. M., Trunova M. V., Demurin Ya. N. Modern trends in breeding and genetic improvement of sunflower varieties and hybrids at VNIIMK. *Vavilovskiy zhurnal genetiki i seleksii* = Vavilov Journal of Genetics and Breeding. 2021;25(4):388–393. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18699/VJ21.042>

2. Bushnev A. S., Mamyrko Yu. V., Podlesnyy S. P., Orekhov G. I., Pavelko I. A. Influence of sowing dates and seed sowing rates on productivity of sunflower hybrids. *Sakharnaya svekla*. 2023;(8):31. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25802/SB.2023.63.90.005>

3. Tishkov N. M., Tilba V. A., Makhonin V. L., Shkarupa M. V. Formirovanie produktivnosti materinskikh liniy gibridov podsol-nechnika pri vyrashchivani s raznoy gustotoy stoyaniya rasteniy. *Maslichnye kul'tury* = Oil crops. 2022;(1(189)):45–53. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2022-1-189-45-53>

4. Orekhov G. I., Bushnev A. S., Kotlyarova I. A., Kurilova D. A. Efficiency of agricultural methods in agrobiocenosis of sunflower on leached black soil of the Western Ciscaucasia. *Maslichnye kul'tury* = Oil crops. 2024;(3(199)):25–39. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2024-3-199-25-39>

5. Tishkov N. M., Tilba V. A., Makhonin V. L., Yakubovskaya A. I., Kameneva I. A., Shkarupa M. V. Efficiency of microbial preparations with polyfunctional action in growing *Helianthus annuus* L. on chernozems leached. *Tavricheskiy vestnik agrarnoy nauki* = Taurida herald of the agrarian sciences. 2022;(3(31)):188–197. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/sycqow>

6. Avdeenko A. P., Tishkin D. P. The effect of herbicides on weed infestation of crops and productivity of sunflower. Resource conservation and adaptability in technologies of crop cultivation and processing of crop production: Proceedings of international scientific and practical conference. Persianovskiy: *Donskoy GAU*, 2020. pp. 55–58. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42695280>

7. Mohammadi K., Heidari G., Javaheri M., Rokhzadi A., Nezhad M. T. K., Sohrabi Y., Talebi R. Fertilization affects the agronomic traits of high oleic sunflower hybrid in different tillage systems. *Industrial Crops and Products*. 2013;44:446–451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.09.028>

8. Sahoo P., Brar A. S., Sharma S. Effect of methods of irrigation and sulphur nutrition on seed yield, economic and bio-physical water productivity of two sunflowers (*Helianthus annuus* L.) hybrids. *Agricultural Water Management*. 2018;206:158–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.009>

9. Al-Attafi M. K. R., Esaulko A. N., Kotova A. S. Influence of macro and micro - fertilizers on the planned yield and productivity of sunflower oilseeds on leached chernozem. *International Agricultural Journal*. 2024;67(6):33. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.55186/25880209_2024_8_6_33

10. Lukomets V. M., Semerenko S. A., Piven V. T., Bushneva N. A. Influence of the main agricultural methods on the development of sunflower diseases and weeds. *Zashchita i karantin rasteniy*. 2020;(10):30–33. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.47528/1026-8634_2020_10_30

11. Khatnyanskiy V. I., Detsyna A. A., Semerenko S. A. Effective protection of seedlings of large-fruited confectionery sunflower from. *Zashchita i karantin rasteniy*. 2021;(6):24–25. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.47528/1026-8634_2021_6_24

12. Semerenko S. A., Bushneva N. A. Influence of filter cake application on wireworms harmfulness and sunflower productivity in the Krasnodar region. *Maslichnye kul'tury* = Oil crops. 2023;(4(196)):62–67. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2023-4-196-62-67>

13. Semerenko S. A., Bushneva N. A. Pesticide effects on soil microflora. *Maslichnye kul'tury* = Oil crops. 2024;(4(200)):132–140. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25230/2412-608x-2024-4-200-132-140>

14. Kagermazova A. Ch., Ivanova Z. A., Nagudova F. Kh. Vliyanie razlichnykh priemov tekhnologii vozdeystvaniya podsolnechnika na ekonomicheskuyu effektivnost' proizvodstva. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* = Modern problems of science and education. 2014;(5):751. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22567165>

15. Turusov V. I., Garmashov V. M. Influence of tillage methods on the fertility of ordinary chernozem and barley productivity under conditions of the southeast of the Central Chernozem region. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2019;33(12):20–25. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-11204>

16. Bushnev A. S., Semerenko S. A., Kurilova D. A., Mamyrko Yu. V., Kotlyarova I. A., Pavelko I. A. The effect of seed encrustation with pesticide compositions on sunflower rhizosphere. Biological plant protection is the basis for the stabilization of agroecosystems: Proceedings of International scientific and practical conference. Krasnodar: OOO «Edvi», 2024. pp. 65–70. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=74497096>

17. Domracheva L. I., Starikov P. A., Kovina A. L., Ashikhmina T. Ya. Application of *trichoderma* micromycetes and trichoderma-based consortia in agrobiotechnology (review). *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* = Theoretical and Applied Ecology. 2024;(1):6–18. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2024-1-006-018>

18. Enkina O. V. The results of research on soil microbiology. The history of scientific research at VNIIMKA for 90 years. Comp. N. I. Bochkarev, S. D. Krokhmal. 2nd ed., corrected. and additional. Krasnodar: *Redaktsiya zhurnala "Sel'skie zori"*, 2003. pp. 239–243.

Сведения об авторах

✉ **Бушнев Александр Сергеевич**, ведущий научный сотрудник лаборатории агротехники агротехнологического отдела, ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В. С. Пустовойта», ул. им. Филатова, д. 17, г. Краснодар, Российская Федерация, 350038, e-mail: vniimk@vniimk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9037-7965>, e-mail: vniimk-agro@mail.ru

Орехов Геннадий Иванович, старший научный сотрудник лаборатории агротехники агротехнологического отдела, ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В. С. Пустовойта», ул. им. Филатова, д. 17, г. Краснодар, Российская Федерация, 350038, e-mail: vniimk@vniimk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9355-738X>

Котлярова Ирина Алексеевна, эксперт 2-й категории лаборатории агротехники агротехнологического отдела, ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В. С. Пустовойта», ул. им. Филатова, д. 17, г. Краснодар, Российская Федерация, 350038, e-mail: vniimk@vniimk.ru

Курилова Дина Александровна, старший научный сотрудник лаборатории защиты растений агротехнологического отдела, ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В. С. Пустовойта», ул. им. Филатова, д. 17, г. Краснодар, Российская Федерация, 350038, e-mail: vniimk@vniimk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6249-7786>

Мамырко Юлия Викторовна, старший научный сотрудник лаборатории агротехники агротехнологического отдела, ФГБНУ «Федеральный научный центр «Всероссийский научно-исследовательский институт масличных культур имени В. С. Пустовойта», ул. им. Филатова, д. 17, г. Краснодар, Российская Федерация, 350038, e-mail: vniimk@vniimk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5688-5416>

Information about the authors

✉ **Alexander S. Bushnev**, leading researcher, the Laboratory of Agricultural Practices, the Department of Agrotechnology, V. S. Pustovoit All-Russian Research Institute of Oil Crops, Filatov st., 17, Krasnodar, Russian Federation, 350038, e-mail: vniimk@vniimk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9037-7965>, e-mail: vniimk-agro@mail.ru

Gennady I. Orekhov, senior researcher, the Laboratory of Agricultural Practices, the Department of Agrotechnology, V. S. Pustovoit All-Russian Research Institute of Oil Crops, Filatov st., 17, Krasnodar, Russian Federation, 350038, e-mail: vniimk@vniimk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9355-738X>

Irina A. Kotlyarova, expert of 2 category of the Laboratory of Agricultural Practices, the Department of Agrotechnology, V. S. Pustovoit All-Russian Research Institute of Oil Crops, Filatov st., 17, Krasnodar, Russian Federation, 350038, e-mail: vniimk@vniimk.ru

Dina A. Kurilova, senior researcher, the Laboratory of Plant Protection, the Department of Agrotechnology, V. S. Pustovoit All-Russian Research Institute of Oil Crops, Filatov st., 17, Krasnodar, Russian Federation, 350038, e-mail: vniimk@vniimk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6249-7786>

Yulia V. Mamyrko, senior researcher, the Laboratory of Agricultural Practices, the Department of Agrotechnology, V. S. Pustovoit All-Russian Research Institute of Oil Crops, Filatov st., 17, Krasnodar, Russian Federation, 350038, e-mail: vniimk@vniimk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5688-5416>

✉ – Для контактов / Corresponding author

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ МИКРОБИОЛОГИЯ И МИКОЛОГИЯ / AGRICULTURAL MICROBIOLOGY AND MYCOLOGY

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.129–140>
УДК 633.113:631.52:57.085.23:632.4



Влияние фильтрата культуральной жидкости *Fusarium sporotrichioides* на каллусную культуру пшеницы

© 2025. В. Ю. Ступко✉, С. Ю. Луговцова, Н. А. Нешумаева

ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Красноярский научно-исследовательский институт сельского хозяйства, г. Красноярск, Российская Федерация

Культивирование каллусов на средах с фильтратами культуральной жидкости (ФКЖ) грибов рода *Fusarium* применяется в селекции на устойчивость к данным патогенам у различных видов растений. Ключевым этапом работы является определение реакции культуры тканей растения на различные концентрации (20 и 40 %) ФКЖ. Проведена оценка динамики параметров роста и развития каллусной культуры (КК) яровой мягкой пшеницы сорта Красноярская 12 при имитации поражения *Fusarium sporotrichioides* при длительном культивировании (до 119 суток). Каллусогенез индуцировали в культуре зародышей на среде Мурасиге-Скуга (МС) с 2,4-Д (1 и 4 мг/л для незрелых и зрелых зародышей соответственно). Каллусы затем помещали на среды с теми же концентрациями 2,4-Д с добавлением ФКЖ (20 и 40 %) и контрольную среду МС без селективного агента. Реакция КК на ФКЖ была заметна уже к 14-му дню культивирования. Признаки некроза отмечали у 10–15 % образцов на средах с ФКЖ. Доля каллусов с хлорофиллсодержащими областями (ХСО) на этом сроке была вдвое меньше на средах с ФКЖ в сравнении с МС. К 28-му дню доля каллусов с ХСО на среде с 20 % ФКЖ отличалась в меньшую сторону от МС в 2–3 раза, 40 % ФКЖ – в 5–7 раз. Размеры каллусов оказались мало информативны в анализе реакции КК на ФКЖ. После 42-го дня на средах с ФКЖ наблюдали возобновление роста КК, замедление некроза, активацию синтеза хлорофилла. На среде МС прогрессировало старение КК, увеличивалась частота некроза каллусов. Аналогичный эксперимент, но включавший пассирование на 14-й день на свежие среды того же состава, не выявил усиления селективного давления. Результаты были либо близки к образцам с непрерывным культивированием (ХСО, некроз), либо превышали их (размер каллусов). Таким образом, использованные уровни ФКЖ обеспечивали отбор устойчивых к токсинам *F. sporotrichioides* клеточных линий пшеницы в пределах 28 суток культивирования. Имеется потенциал увеличения селективирующего давления.

Ключевые слова: *Triticum aestivum* L., культуральный фильтрат, клеточная селекция, соматическая изменчивость

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (тема № 124012900555-6).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Ступко В. Ю., Луговцова С. Ю., Нешумаева Н. А. Влияние фильтрата культуральной жидкости *Fusarium sporotrichioides* на каллусную культуру пшеницы. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2025;26(1):129–140. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.129-140>

Поступила: 16.08.2024

Принята к публикации: 03.02.2025

Опубликована онлайн: 26.02.2025

Effect of culture filtrates of *Fusarium sporotrichioides* on wheat callus culture

© 2025. Valentina Yu. Stupko✉, Svetlana Yu. Lugovtsova,
Nadezhda A. Neshumaeva

Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Krasnoyarsk Research Institute of Agriculture, Krasnoyarsk, Russian Federation

Cultivation of calli on media with culture filtrates (CF) of fungi of the genus *Fusarium* is used in breeding for the resistance to these pathogens of somaclonal lines of many plant species. The key is to determine the response of plant tissue

culture to different concentrations (20 and 40 %) of CF. The dynamics of the growth and development parameters of spring soft wheat callus culture (CC) was assessed under simulating *F. sporotrichioides* infection in vitro in long-term cultivation (up to 119 days). Callusogenesis was induced in the culture of embryos on Murashige-Skoog (MS) medium with 2,4-D (1 mg/L for immature embryos, 4 mg/L for mature embryos). Calli were then cultured on media with the same levels of 2,4-D under different levels of CF (20 % and 40 %). The response of CC to CF was noticeable already by the 14th day of cultivation. Signs of necrosis were observed in 10–15 % of samples on media with CF. The proportion of calli with chlorophyll containing areas (CCA) at this period was half as much on media with CF compared to MS. By day 28, the medium with 20 % of CF had CCA quantity less than MS by 2–3 times, medium with 40 % of CF – had CCA quantity less by 5–7 times. The size of calli turned out to be less informative in the analysis of the response of CC to CF. After the 42nd day, media with CF showed the resumption of CC growth, slowing down of necrosis, and activation of chlorophyll synthesis. On the MS medium, the senescence of CC progressed, the frequency of calli necrosis increased. The same experiment but including passaging calli on the 14th day onto fresh media of the same composition did not reveal the increase in selective pressure. The results were either close to (CCA, necrosis) or higher (callus size) than those of the samples under continuous cultivation. Thus, the levels of CF used ensure the selection of wheat cell lines resistant to *F. sporotrichioides* toxins within 28 days of cultivation. There is a potential to increase selection pressure.

Keywords: *Triticum aestivum* L., culture filtrate, cell selection, somaclonal variation

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 “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences” (theme No. 124012900555-6).

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: Stupko V. Yu., Lugovtsova S. Yu., Neshumaeva N. A. Effect of culture filtrates of *Fusarium sporotrichioides* on wheat callus culture. *Agrarnaya nauka Euro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):129–140. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.129-140>

Received: 16.08.2024

Accepted for publication: 03.02.2025

Published online: 26.02.2025

Фузариоз колоса и зерна – широко распространенное заболевание пшеницы, эпифитотии которого зафиксированы в разных регионах Российской Федерации. Последствием вспышек заболеваний явились контаминация зерна микотоксинами (до 100 %), высокая степень поражения колоса и зараженности зерна пшеницы (до 80 %) [1]. Вспышки заболевания периодически наблюдаются на Дальнем Востоке, в Краснодарском и Ставропольском краях, в Ростовской области [2, 3].

Проблема создания устойчивых к фузариозам сортов пшеницы для условий Восточной Сибири является актуальной. Как показывают недавние исследования фитосанитарного состояния зерна [4], виды *Fusarium graminearum* Schwabe и *F. sporotrichioides* Sherb. встречаются в зерне пшеницы намного чаще в Восточной Сибири, чем на Урале и в районе Волги. Данные количественных и качественных анализов ДНК *F. sporotrichioides* свидетельствуют о высокой зараженности зерна (более 70 % образцов), в частности максимальном уровне этого патогена в зерне из Красноярского края. Отмечено значительное загрязнение зерна ДОН и Т-2/НТ-2 токсинами.

Современные методы маркер-ассоциированной селекции позволили создать в Китае и Канаде ряд сортов пшеницы с устойчивостью к фузариозу колоса. Данные современных генетических исследований открывают все новые

маркеры, сцепленные с устойчивостью, но в то же время требуют дополнительных исследований и пока далеки от внедрения в практическую селекцию. Из-за комплексности генов, кодирующих устойчивость к данному патогену, имеются сложности объединения локуса количественных признаков (ЛКП / Quantitative Trait Loci – QTL) и взаимодействия отдельных генов устойчивости к фузариозам [5].

Одним из методов создания устойчивых генотипов является клеточная биотехнология. В работах с зерновыми используются как каллусные культуры [6, 7], так и культуры пыльников [8, 9, 10, 11]. При создании сортов методом клеточного отбора основным механизмом устойчивости становится снижение аккумуляции токсинов и устойчивость к их высоким концентрациям [12]. Помимо химически чистых препаратов микотоксинов для создания селективного давления [9, 10] используется также фильтрат культуральной жидкости (ФКЖ) гриба [13, 14]. Ключевым моментом в данной технологии является обеспечение достаточного селективного давления, создающего условия для отбора устойчивых линий, не вызывая при этом 100%-ной гибели клеточной популяции. В исследовании [14] уровень ФКЖ *F. oxysporum* в 35 % приводил к 100%-ной гибели каллусов томата. Авторы указывают на зависимость оптимального уровня ФКЖ как от типа патогена, так и вида растения. Так, например, для

клеточной селекции лилии была задействована концентрация ФКЖ *F. oxysporum* 80 % [13]. В работе с куркумой [15] достаточным оказался 7%-ный уровень *F. oxysporum*. В исследованиях на каллусах гороха [16] выявлена зависимость процента выживаемости каллусов и частоты морфогенеза от изначальной устойчивости генотипа к *F. oxysporum*, а оптимальной признана концентрация ФКЖ – 5 % от объема питательной среды.

Цель исследования – оценка реакции каллусной культуры яровой мягкой пшеницы сорта Красноярская 12 на различные концентрации (20 и 40 %) ФКЖ *F. sporotrichioides* в питательной среде при одноэтапной селекции на этапе пролиферации.

Научная новизна – в ходе длительного культивирования (более 30 суток) каллусов пшеницы на средах с ФКЖ *F. sporotrichioides* выявлено снижение селективирующего давления в процессе культивирования, установлена малоинформативность объемных параметров каллусов для оценки реакции КК на стресс.

Материал и методы. Исследования проводили в 2023-2024 гг. Объектом исследования служила яровая мягкая пшеница сорта Красноярская 12. Из сортов селекции Красноярского НИИСХ он наиболее востребован в Восточной Сибири. Рекомендован для возделывания в Красноярском и Забайкальском регионах, республиках Бурятия, Хакасия и Тыва. Обладает высокой устойчивостью к фузариозу по зараженности зерна (до 5 %).

Для получения ФКЖ использовали штамм F37 вида *F. sporotrichioides*, выделенный в 2021 году из зерна пшеницы сорта Новосибирская 15 (Участок сельскохозяйственного производства «Минино») и показавший высокую степень фитотоксичности в отношении семян и проростков зерновых культур. Штамм *F. sporotrichioides* F37 культивировали на жидкой среде Чапека в течение 21 суток при 23 °C в темноте. Затем КЖ отделяли от биомассы с помощью бумажных фильтров и дробно стерилизовали методом тиндализации.

Схема опыта включала два эксперимента: в первом – для получения каллусной культуры использовали незрелые зародыши (молочно-восковая спелость), во втором – зрелые. Зародыши помещали на среду Мурасиге-Скуга (МС) с добавлением 2,4-Д (1 и 4 мг/л для незрелых и зрелых зародышей соответственно).

Спустя 30 суток культивирования каллусы, образовавшиеся в культуре незрелых зародышей,

случайным образом отбирали на среды пролиферации (МС + 1 мг/л 2,4-Д), содержащие ФКЖ гриба *F. sporotrichioides* в концентрациях 20 и 40 %, и контрольную среду МС без добавления селективного агента ($n = 4$, $N = 160$, где n – число биологических повторностей, N – общее число образцов).

В случае с культурой зрелых зародышей, спустя 30 суток, на каждый вариант среды пролиферации (МС + 4 мг/л 2,4-Д; 20 или 40 % ФКЖ) высаживали по 20 каллусов, отобранных случайным образом ($n = 4$, $N = 80$). Через 2 недели культивирования половину каллусов с каждой среды пассировали на свежую среду того же состава.

В ходе культивирования раз в неделю с момента пассирования на среду пролиферации фиксировали размер и цвет каллусов, отмечали появление признаков некроза, хлорофиллсодержащих областей (ХСО). Объем каллуса рассчитывали по формуле:

$$V = a \cdot b, \quad (1)$$

где a – диаметр каллуса, мм;

b – высота каллуса, мм.

Статистическую обработку проводили с использованием статистического пакета R 4.0.4 в среде разработки RStudio 1.4.1103 (2009-2024 RStudio, PBC). Для оценки достоверности влияния концентрации ФКЖ в питательной среде на размер каллусов применяли тест Краскелла-Уоллеса. Данные представлены в виде медианных значений (Me). Планки погрешности на графиках представляют собой интерквартильный размах [25 %/75 %]. Для сравнения частоты проявления признаков «некроз каллуса» и «наличие ХСО» при различных концентрациях ФКЖ использовали χ^2 Йейтса с поправкой Бонферони-Холма для множественных сравнений по каждому дню наблюдений.

Результаты и их обсуждение. Оценку динамики роста и развития каллусной культуры пшеницы проводили в ходе культивирования на среде с ФКЖ наиболее агрессивного из имеющихся в коллекции КрасНИИСХ штаммов *F. sporotrichioides*. Использование ФКЖ, а не фузариевой кислоты, основного элиситора грибов рода *Fusarium*, обосновывается ее низкой селективной эффективностью. По данным [17], требуется присутствие других компонентов ФКЖ, для того чтобы фузариевая кислота проявляла себя как селективный агент.

В первом эксперименте в связи с высокой токсичностью *F. sporotrichioides* и чувстви-

тельностью пшеницы, как культуры, были выбраны концентрации ФКЖ 20 и 40 %. Работы с овсом в этом же направлении велись ранее на концентрациях вплоть до 50 % [7].

Одним из критериев отбора устойчивых соматоклональных линий на средах с ФКЖ является сохранение способности каллусных клеток к пролиферации [14]. На средах с ФКЖ *F. sporotrichioides* наблюдали замедление темпов увеличения объема каллуса вплоть до 42 суток культивирования (табл. 1). В сравнении с активной пролиферацией тканей на среде МС без ФКЖ рост каллусов на остальных средах почти остановился. Однако в промежутке между 42-м

и 70-м днем культивирования процессы деления клеток возобновились как на среде, содержащей 20 % ФКЖ, так и при большем уровне селективного давления. Рост части каллусов на среде с 40 % ФКЖ продолжился. И хотя более половины из культивируемых в этих условиях каллусов остановились в развитии, оставшая часть возобновила пролиферацию и к 119 суткам частоты значительно сместились в сторону более крупных каллусов, что видно из увеличения интерквартильного размаха (табл.) и снижения размеров каллусов на средах с ФКЖ, в то время как на контрольной среде рост продолжился.

Таблица – Динамика роста каллусов яровой пшеницы сорта Красноярская 12 на средах с различным содержанием фильтрата культуральной жидкости гриба *F. sporotrichioides*, мм³ (медиана±[25/75]) / Table – Dynamics of ‘Krasnoyarskaya 12’ cultivar spring wheat calluses growth on the media with different concentration of culture filtrate of *F. sporotrichioides*, mm³ (median±[25/75])

Период культивирования, сутки / Cultivation period, days	Концентрация ФКЖ в питательной среде, % / Concentration of culture filtrate in the medium, %		
	0	20	40
28	39,0[18,0/101,0] ^a	40,75[101,0/22,9] ^{ab}	30,0[22,9/85,3] ^b
42	87,0[55,0/81,0] ^a	45,0[81,0/25,8] ^b	33,0[25,8/99,0] ^b
70	463,0[274,0/347,0] ^a	216,0[347,0/141,0] ^b	175,0[141,0/378,0] ^b
119	571,5[462,5/328,5] ^a	204,0[328,5/141,6] ^b	93,0[141,6/516,0] ^c

Примечание. Одинаковыми буквами отмечены значения, не отличающиеся при $p < 0,05$ в пределах одних суток / Note. The same letters indicate values that do not differ within one day at $p < 0.05$

В каллусной культуре пшеницы, как показано ранее, активно идут процессы формирования ХСО [18], что также является показателем жизнеспособности и морфогенетического потенциала каллусов. Этот параметр активно изменяется под действием стрессоров. В контрольных условиях ХСО образовывались наиболее активно, и на 14-е сутки доля образцов с ХСО на среде МС уже в два раза превышала таковую на средах с ФКЖ (рис. 1). Параллельно с увеличением доли ХСО в контроле происходила деградация ХСО на среде с 40% ФКЖ. На 21-й день различия со средой с меньшей концентрацией ФКЖ стали статистически значимыми.

На фоне активизации роста каллусов после 42 суток культивирования на среде с 20 % ФКЖ наблюдали рост доли каллусов с ХСО, которая значительно выросла к 70-м суткам в сравнении с уровнем, зафиксированным на 42-е сутки (рис. 1).

Аналогичный процесс отмечен и в отношении каллусов на среде с 40 % ФКЖ – доля

образцов с ХСО увеличилась вдвое в период с 42 до 70 суток наблюдения (рис. 1). Увеличение доли каллусов с ХСО на среде с 40 % ФКЖ продолжилось и далее, и к 119-м суткам этот показатель сравнялся на всех средах. В контрольных условиях это произошло за счёт старения культуры и некроза тканей (рис. 2). Несмотря на присутствие процессов старения и некроза и на средах с ФКЖ, формирование ХСО после 42 суток, таким образом, свидетельствует об активизации процессов органо-генеза на средах с 20 и 40 % ФКЖ.

Важным критерием эффективности отбора устойчивых соматоклональных вариантов считается доля некроза в каллусной культуре [14, 19]. Признаками некроза тканей в настоящем исследовании считали появление оранжево-коричневой окраски и окрашивание среды вокруг каллуса в оранжевый цвет. Эти процессы связаны со старением культуры и выделением в среду фенольных соединений, что происходит при культивировании многих видов растительных тканей *in vitro* [20], а также со стрес-

совыми условиями культивирования. В настоящей работе такими факторами выступали элиситоры *F. sporotrichioides*, содержащиеся в ФКЖ. Процессы некроза на среде с 40 %

ФКЖ развились к концу второй недели. С 28–70-е сутки культивирования отмечали достоверные отличия доли каллусов с некрозами на всех исследованных средах при $p < 0,05$.

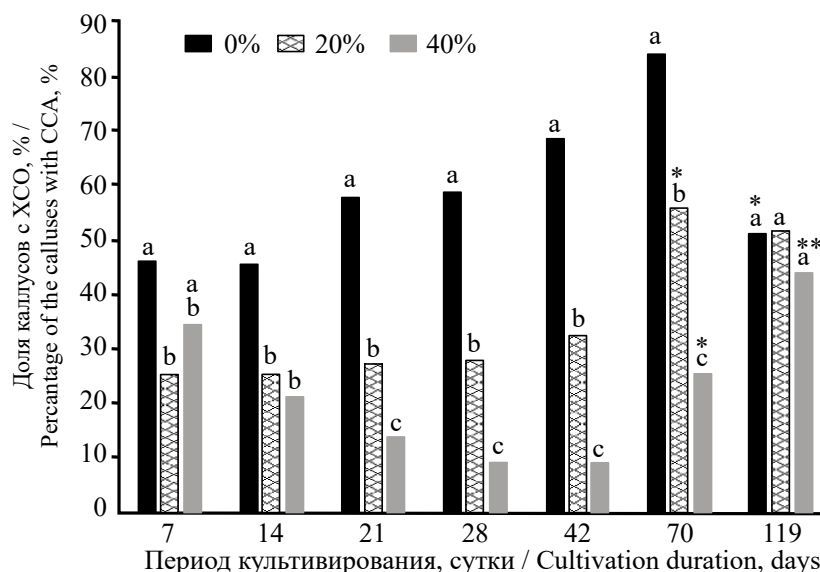


Рис. 1. Формирование хлорофиллсодержащих областей (ХСО) в каллусной культуре незрелых зародышей яровой пшеницы сорта Красноярская 12 на средах с различным содержанием ФКЖ гриба *F. sporotrichioides*. Одинаковыми буквами здесь и на рис. 2–5 отмечены значения, не отличающиеся при $p < 0,05$ в пределах одних суток. Достоверные отличия в сравнении с данными, полученными на 42-е сутки на этой же среде при * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ /

Fig. 1. Development of chlorophyll containing areas (CCA) in callus culture of immature embryos of 'Krasnoyarskaya 12' spring wheat cultivar on the media with different levels of CF of *F. sporotrichioides*. The same letters here and further on fig. 2–5 indicate values that do not differ within one day at $p < 0.05$; statistically significant difference compared to data obtained on the 42th day on the same medium at * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

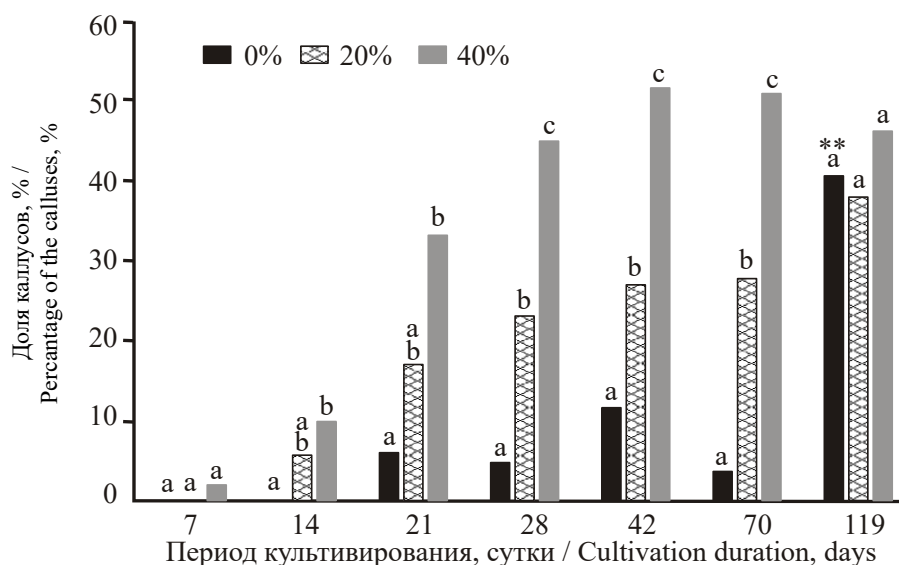


Рис. 2. Динамика некроза каллусов яровой пшеницы сорта Красноярская 12 на средах с различным содержанием ФКЖ гриба *F. sporotrichioides*.

Достоверные отличия в сравнении с данными, полученными при предыдущем измерении на этой же среде при ** $p < 0,01$ /

Fig. 2. Dynamics of callus necrosis of 'Krasnoyarskaya 12' spring wheat cultivar on the media with different concentrations of CF of *F. sporotrichioides*.

Statistically significant difference compared to data obtained by previous measuring on the same medium at ** $p < 0.01$

На фоне роста каллусов на обеих средах с ФКЖ, описанного выше (табл. 1), наблюдали

остановку процессов некроза на среде с 20 % ФКЖ уже на 42-е сутки, и на среде с 40 %

ФКЖ – на 70-е сутки культивирования. На 119-е сутки заметно снижение доли каллусов с некрозом на среде с 40 % ФКЖ из-за возобновления роста культуры и формирования пролиферирующих областей на каллусах, имевших до этого признаки 100%-го некроза тканей. В то время как на контрольной среде доля каллусов с некрозом достигла уровня, сопоставимого со стрессовыми условиями на фоне продолжающегося старения культуры. На среде без ФКЖ не выявлено случаев возобновления пролиферации тканей.

Описанное явление возобновления роста культуры, по всей видимости, связано с деградацией токсинов в питательной среде со временем, что позволяет клеткам, сохранившим жизнеспособность, перейти к пролиферации: на среде с 20 % ФКЖ это происходит раньше, чем на среде с 40 % ФКЖ. Образцы, возобно-

вившие рост, можно при этом считать прошедшими селективный отбор – это те единичные клетки в массе клеток, не обладающие устойчивостью, которые выжили и при снижении селективного давления начали пролиферировать.

Для уточнения характера процессов, происходящих в питательной среде в ходе культивирования каллусов, проведен следующий эксперимент, где часть каллусов пересаживали на свежие среды в конце второй недели культивирования. Предполагалось, что культивирование каллусов на свежеприготовленных средах с ФКЖ позволит поддерживать уровень стрессового давления.

После пассирования на свежую среду активизировался рост каллусов на среде с 40 % ФКЖ (рис. 3), где размер каллуса был больше на четверть, чем у образцов без пересадки.

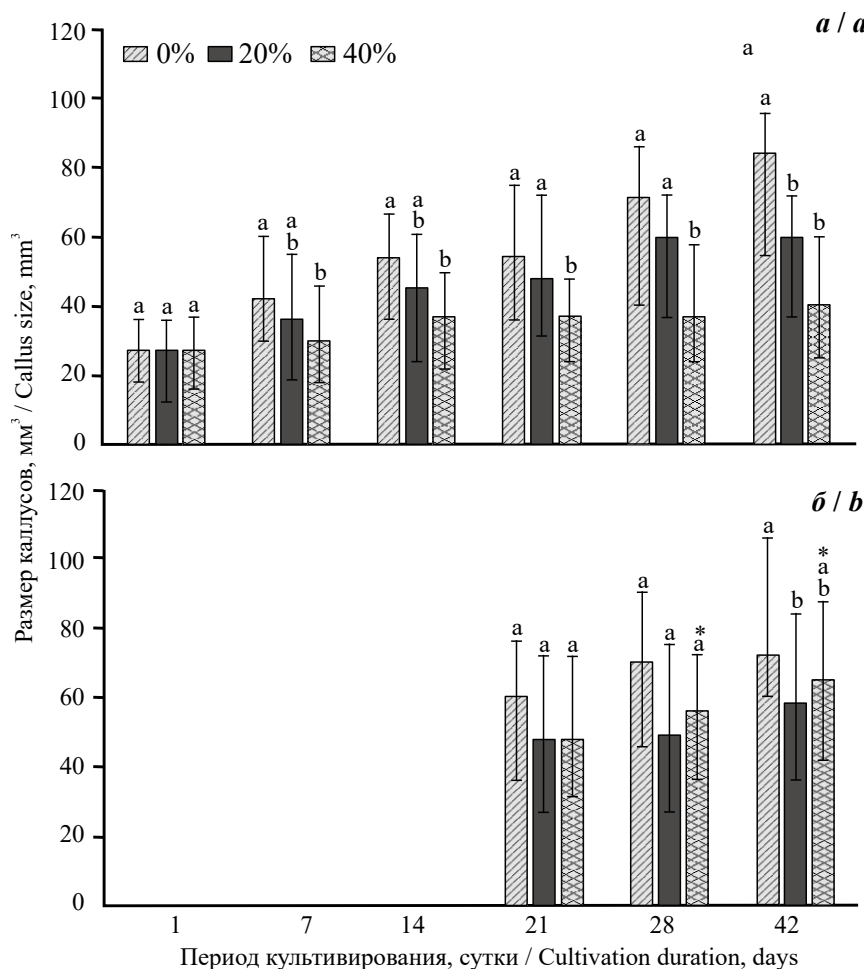


Рис. 3. Рост каллусов в культуре зародышей яровой пшеницы сорта Красноярская 12 на средах с различным содержанием ФКЖ в ходе непрерывного культивирования (а) и после пассирования на свежую среду (б) (медиана±[25/75]). Здесь и на рис. 5 * – статистически значимое различие в размерах каллусов на этой же среде при непрерывном культивировании при $p < 0,05$ /

Fig. 3. Callus growth in embryos culture of 'Krasnoyarskaya 12' spring wheat cultivar on the media with different levels of CF under continuous cultivation (a) and after passaging to a fresh medium (b) (median±[25/75]). Here and on fig. 5 * – statistically significant difference in callus size on the same medium under continuous cultivation at $p < 0.05$

По разнице в характере распределения (интерквартильный размах) хорошо заметно, что варианты с пересадкой имели распределение размеров каллусов на 42-е сутки, схожее с данными предыдущего эксперимента (табл. 1). Достоверные различия в медианном размере этих каллусов в зависимости от среды культивирования появились только на 35-е сутки (рис. 3). При этом на среде с 40 % ФКЖ каллусы имели размер близкий к таковому в контрольных условиях вплоть до 35 суток наблюдения. Также размеры этих каллусов на 28-е и 42-е сутки были значительно больше, чем

образцов в варианте с непрерывным культивированием в эти же сроки.

Активный рост каллусов на свежих средах с токсинами после пересадки подтверждается и формированием ХСО, в результате чего доля их на стрессовых средах к 21-м суткам стала близкой к контролю (рис. 4). Далее различия с контрольной средой стали статистически значимы, однако, к 35-м суткам доля каллусов с ХСО на среде с 20 % ФКЖ оставалась на уровне 21-х суток и изменялась в пределах погрешности вплоть до 42 суток наблюдения.

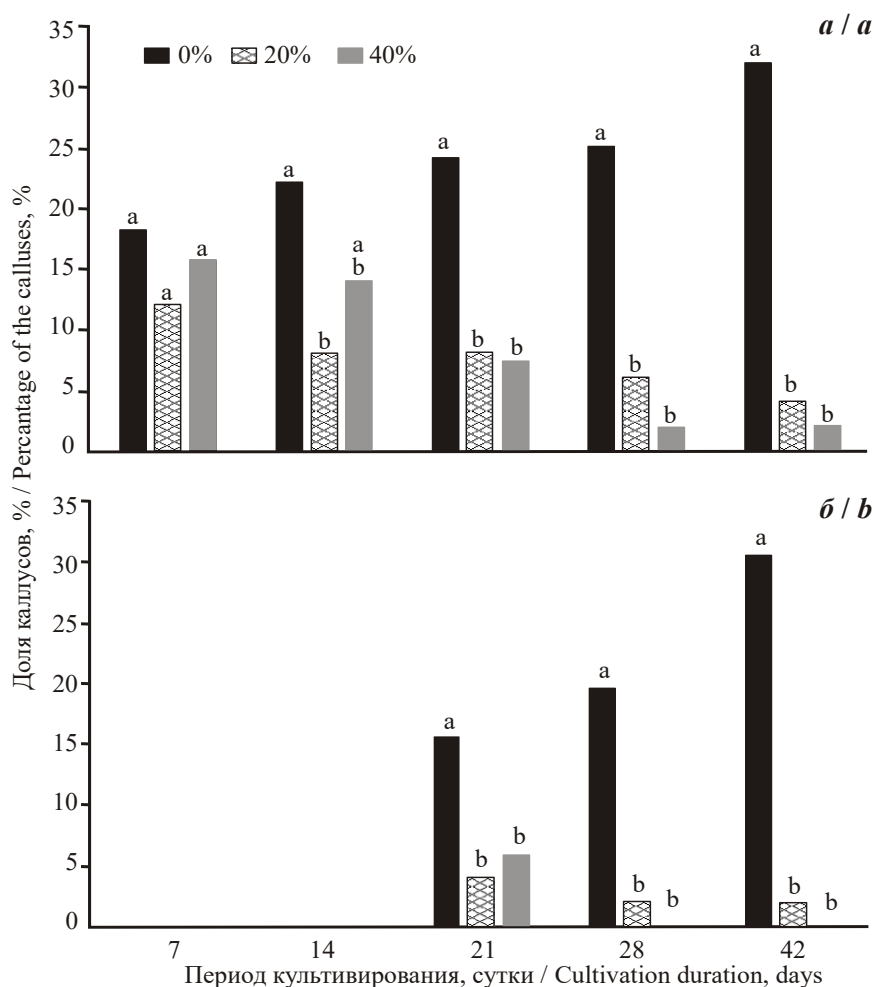


Рис. 4. Формирование хлорофиллсодержащих областей (ХСО) в каллусной культуре яровой пшеницы сорта Красноярская 12 на средах с различным содержанием ФКЖ при непрерывном культивировании (а) и после пассирования на свежие среды (б) /

Fig. 4. Development of chlorophyll containing areas (CCA) in callus culture of 'Krasnoyarskaya 12' spring wheat cultivar on the media with different concentration of CF under continuous cultivation (a) and after passaging to fresh media (b)

При сравнении каллусов без пересадки и с пересадкой не было обнаружено различий в доле образцов с ХСО в рамках одних условий. Необходимо отметить, что видимую остановку

роста на средах с ФКЖ как в первом, так и во втором экспериментах (табл. 1, рис. 3) наблюдали ближе к концу четвертой недели культивирования.

В отличие от процесса увеличения размера каллуса, процессы некроза однозначно указывали на реакцию каллусов на присутствие ФКЖ (рис. 2). Однако после пассирования на свежую среду с ФКЖ некроз каллуса не

только не ускорился в сравнении с вариантом с непрерывным культивированием, но и, судя по доле каллусов с признаками некроза на среде с 40 % ФКЖ на 28-е сутки, пересадка на свежую среду замедлила этот процесс (рис. 5).

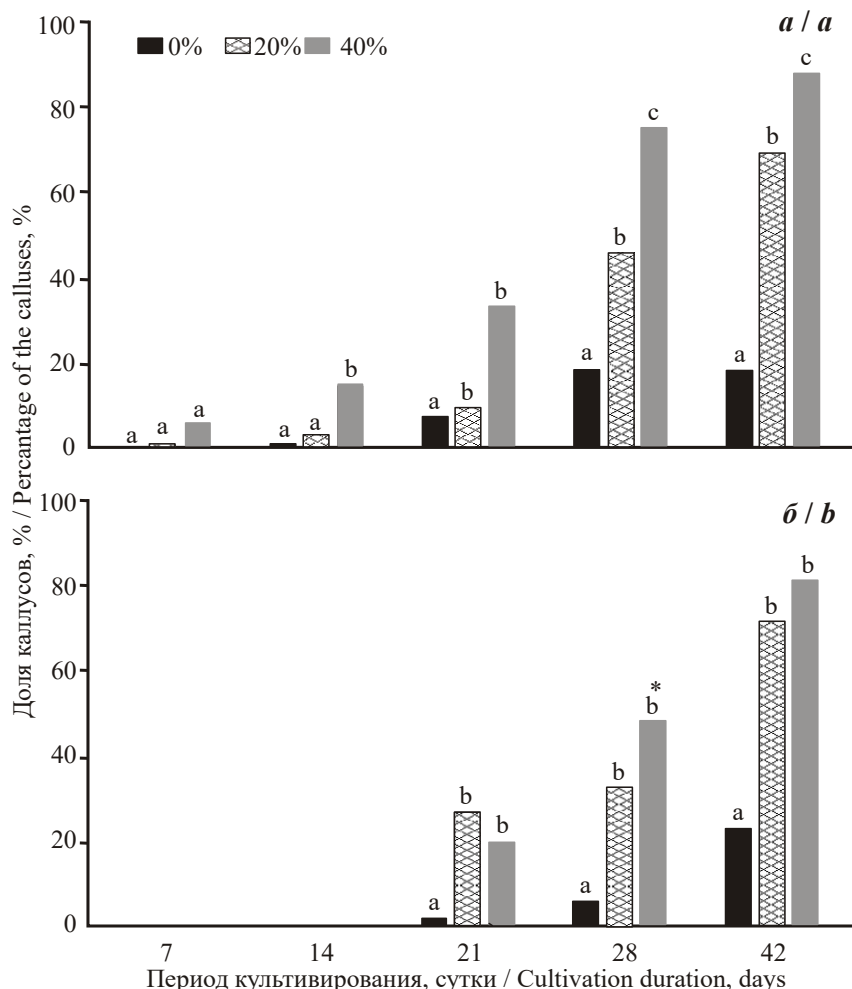


Рис. 5. Некроз каллусных тканей в культуре яровой пшеницы сорта Красноярская 12 на средах с различным содержанием ФКЖ при непрерывном культивировании (а) и после пассирования на свежие среды (б) /

Fig. 5. Necrosis of callus tissue in the culture of 'Krasnoyarskaya 12' spring wheat cultivar on the media with different level of CF under continuous cultivation (a) and after passaging to a fresh medium (b)

Однако к 42-м суткам варианты культивирования сравнивались по указанному параметру. Следует отметить и отсутствие различий в доли каллусов с некрозом после пассирования между средами с разной концентрацией ФЖК, хотя при непрерывном культивировании их отмечали.

Необходимо учесть, что признаки, указывающие на деградацию токсинов – возобновление пролиферации каллуса в областях некроза – проявились в первом эксперименте в сроки больше, чем 42 суток.

Таким образом, пассирование на свежие среды с ФКЖ не только не усиливало селек-

тивное давление этих условий, но и поддерживало рост каллусной культуры вплоть до темпов, наблюдаемых в контрольных условиях.

По всей видимости это происходило за счёт повышения уровня питательных веществ в среде. В то время как при непрерывном культивировании давление селективных факторов идет параллельно с исчерпанием питательных элементов в ближайшем окружении каллусных тканей, что снижает их способность сопротивляться токсическому воздействию ФКЖ.

Во многих работах по селекции *in vitro* на устойчивость к фузариозам используется

многоступенчатый принцип отбора, когда клеточные линии культивируются либо несколько раз на средах с одинаковой концентрацией ФКЖ [14], либо последовательно пассируются на среды со всё более повышающимся уровнем селективного агента [15, 19].

Продолжительность каждого пассажа обычно равна в этом случае 30 суткам, что, вероятно, соответствует периоду сохранения активной концентрации селектирующего агента. Наблюдаемое возобновление роста культуры пшеницы в текущем эксперименте после 42 суток подтверждает эту гипотезу. Однако нигде в упоминаемых работах не указывается на такое обоснование продолжительности циклов культивирования. В свою очередь проявляющиеся к концу третьей недели признаки некроза, даже в отсутствии ФКЖ, говорят о совмещении на этом временном отрезке процессов старения с воздействием селектирующего давления. В результате отобранные по признаку устойчивости к ФКЖ клеточные линии могут быть отбракованы из-за некроза вследствие старения культуры.

В свою очередь повторный отбор, по всей видимости, происходит в отношении клеточных линий, сформировавшихся в результате пролиферации на свежей среде. Об этом свидетельствует наблюдаемый в настоящем эксперименте активный рост культуры пшеницы в присутствии высоких концентраций ФКЖ при пассировании на новую питательную среду.

Возобновление активного роста каллусов пшеницы на средах с ФКЖ при пересадке в конце второй недели культивирования свидетельствует в пользу произошедшего отбора устойчивых клеточных линий в первые две недели. Исходя из данных других исследователей, описанных выше, это вряд ли повысит эффективность отбора, но может способствовать появлению всё более отличных от исходного генотипа соматоклональных вариаций.

Заключение. Реакция каллусной культуры яровой пшеницы сорта Красноярская 12 на ФКЖ штамма гриба *F. sporotrichioides* F37 прослеживается по сниженному уровню синтеза хлорофилла и ускорению процессов синтеза фенольных соединений с выделением их в окружающую питательную среду в сравнении с контрольными условиями культивирования. Разница при этом достигает 2-3-кратного уровня уже при концентрации ФКЖ 20 %. Судя по данным, полученным на среде с содержанием 40 % ФКЖ, пределы жизнеспособности культуры каллусов не достигнуты и имеется потенциал увеличения эффективности отбора соматоклональных линий за счёт повышения селектирующего давления. Следует учесть при этом, что выход устойчивых линий снизится, однако, будут отбираться наиболее устойчивые варианты. Возобновление роста на фоне вероятной деградации токсинов в среде свидетельствует о присутствии отдельных клеточных линий, сохранивших жизнеспособность в условиях селективного давления на фоне большого объема некротизации тканей. Что делает исследованные уровни ФКЖ пригодными для селекции клеточных линий по признаку толерантности к токсинам *F. sporotrichioides*. Размер каллуса при этом, по всей видимости, не является достаточно информативным критерием реакции культуры на стрессовые условия в случае работы с пшеницей и данным селективным агентом. Уровень с содержанием 40 % ФКЖ является достаточным, поскольку к 28-м суткам культивирования приводит к полному некрозу почти 50 % образцов в культуре незрелых зародышей пшеницы, и близкой – к 80 % в культуре зрелых зародышей, с сохранением уровня ХСО в пределах 10 %. Дополнительный цикл отбора в этом случае не является необходимым. Период культивирования в пределах 21–28 суток является достаточным и приводит к отбору устойчивых клеточных линий.

Список литературы

1. Костерина Н. А. Анализ современного состояния проблемы фузариоза колоса и зерна пшеницы в Российской Федерации. Аграрный вестник Урала. 2023;23(5):49–60.
DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2023-234-05-49-60> EDN: LQLAOZ
2. Гагкаева Т. Ю., Гаврилова О. П., Орина А. С., Гогина Н. Н. Чрезвычайная ситуация 2019 г. и болезни зерна в Амурской области. Защита и карантин растений. 2020;(8):19–21.
Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43459556> EDN: VPTQZH

3. Кремнева О. Ю., Кудинова О. А., Волкова Г. В. Эффективность фунгицида «Фалькон», КЭ против фузариоза колоса пшеницы в условиях Краснодарского края. Современные подходы и методы в защите растений: мат-лы Всеросс. научн.-практ. конф. с междунаро. участием. Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2018. С. 29–31.
Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39109155> EDN: DPEOYO
4. Gagkaeva T., Gavrilova O., Orina A., Lebedin Y., Shanin I., Petukhov P., Eremin S. Analysis of toxigenic *Fusarium* species associated with wheat grain from three regions of Russia: Volga, Ural, and West Siberia. *Toxins*. 2019;11(5):252. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins11050252>
5. Fernando D., Oghenekaro A. O., Tucker J. R., Badea A. Building on a foundation: advances in epidemiology, resistance breeding, and forecasting research for reducing the impact of *Fusarium* head blight in wheat and barley. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 2021;43(8):495–526. DOI: <https://doi.org/10.1080/07060661.2020.1861102>
6. Yao J., Ma H., Lu W. Progress on inheritance and breeding for wheat scab resistance in JAAS. *Cereal Research Communications*. 2008;36:189–191.
7. Луговцова С. Ю., Ступко В. Ю., Нешумаева Н. А. Влияние культуральных фильтратов грибов рода *Fusarium* на каллусные культуры овса. *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2023;53(10):15–22. DOI: <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2023-10-2> EDN: NAVHBS
8. Eudes F., Badea A., Laroche A., Gaudet D., Graf R., Sadasivaiah S. In vitro selection and molecular markers for early screening of *Fusarium* head blight resistance wheat. In: Xu Z., Li J., Xue Y., Yang W. (eds) *Biotechnology and Sustainable Agriculture 2006 and Beyond*. Springer, Dordrecht, 2007. pp. 349–352.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6635-1_56
9. Legge W. G., Tucker J. R., Bizimungu B., Tekauz A., Noll J. S., Fetch Jr. T. G., et al. Norman barley. *Canadian Journal of Plant Science*. 2011;91(6):1105–1113. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjps2010-020>
10. Legge W. G., Tucker J. R., Bizimungu B., Tekauz A., Fetch Jr. T. G., Haber S., et al. Taylor barley. *Canadian Journal of Plant Science*. 2013;93(5):969–977. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjps2013-126>
11. Ryabova D., Randhawa H. S., Kathiria P., Jiang F., Spaner D., Hucl P., et al. Development of new wheat varieties resistant to FHB through microspore *in vitro* selection technology. *National Fusarium Head Blight Forum: proceedings*. St. Louis MO, United States, 2016. pp. 92.
12. Gosman N., Chandler E., Thomsett M., Draeger R., Nicholson P. Analysis of the relationship between parameters of resistance to *Fusarium* head blight and *in vitro* tolerance to deoxynivalenol of the winter wheat cultivar WEK0609. *European Journal Plant Pathology*. 2005;111(1):57–66. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10658-004-2733-8>
13. Zhang Y. P., Jiang S., Qu S. P., Yang X. M., Wang X. N., Ma L. L., et al. In vitro selection for *Fusarium* resistant oriental lily mutants using culture filtrate of the fungal agent. *Acta Horticulturae*. 2014;1027:205–212. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1027.22>
14. Shaunak I., Sharma R., Sharma P., Gupta M., Bhardwaj R. K. Developing resistance against soil-borne *Fusarium* pathogen causing tomato wilt through *in vitro* cell line selection. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2023;153:91–104. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11240-023-02446-1>
15. Kuanar A., Nayak P. K., Subudhi E., Nayak S. In vitro selection of turmeric somaclone resistant to *Fusarium oxysporum* f. sp. *Zingiberi*. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*. 2014;84:1077–1082. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40011-013-0295-2>
16. Тагиманова Д. С., Рашиденова Ж. А., Хапилина О. Н. Скрининг резистентных каллусов гороха (*Pisum sativum* L.) на селективных средах с культуральным фильтратом *Fusarium oxysporum* L. *Биотехнология. Теория и практика*. 2013;(3):55–60. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25612905> EDN: VOMRDH
17. Borrás O., Bermudez R. S. The pineapple-*Fusarium* subglutinans interaction: an early selection system for disease resistance. In Book: *Mass screening techniques for selecting crops resistant to disease*. FAO/IAEA (eds). Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010. pp. 159–172.
18. Терлецкая Н. В., Ступко В. Ю., Исакова А. Б., Зобова Н. В., Гаевский Н. А. Фотоморфогенез эмбриогенных каллусов пшеницы в условиях эдафических стрессов. *Известия Уфимского научного центра РАН*. 2018;(3-5):43–51. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36293992> EDN: VJYVJJ
19. Yezhebayeva R. S., Abekova A. M., Bersimbaeva G. H., Konysbekov K. T., Bastaubaeva S. O., Roik N. V., Urazaliev K. R. *In Vitro* Cell Selection of Sugar Beet for Resistance to Culture Filtrate of the Fungus *Fusarium oxysporum*. *Cytology and Genetics*. 2019;53:307–314. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0095452719040042>
20. Баймухаметова Э. А., Кулуев Б. Р. Потемнение растительных тканей при культивировании *in vitro* и способы его предотвращения. *Биотехнология*. 2020;36(2):26–42.
DOI: <https://doi.org/10.21519/0234-2758-2020-36-2-26-42> EDN: ZBGVAO

References

1. Kosterina N. A. Analysis of the current state of the problem of fusarium ear and grain of wheat in the Russian Federation. *Agrarnyy vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals. 2023;23(5):49–60. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2023-234-05-49-60>
2. Gagkaeva T. Yu., Gavrilova O. P., Orina A. S., Gogina N. N. Emergency situation in 2019 and grain diseases in the Amur region. *Zashchita i karantin rasteniy*. 2020;(8):19–21. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43459556>
3. Kremneva O. Yu., Kudinova O. A., Volkova G. V. The effectiveness of the fungicide "Falcon", CE against fusarium of wheat ears in the Krasnodar territory. Modern approaches and methods in plant protection: Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation. Ekaterinburg: *Ural'skiy federal'nyy universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B. N. El'tsina*, 2018. pp. 29–31. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39109155>
4. Gagkaeva T., Gavrilova O., Orina A., Lebedin Y., Shanin I., Petukhov P., Eremin S. Analysis of toxigenic *Fusarium* species associated with wheat grain from three regions of Russia: Volga, Ural, and West Siberia. *Toxins*. 2019;11(5):252. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins11050252>
5. Fernando D., Oghenekaro A. O., Tucker J. R., Badea A. Building on a foundation: advances in epidemiology, resistance breeding, and forecasting research for reducing the impact of Fusarium head blight in wheat and barley. *Canadian Journal of Plant Pathology*. 2021;43(8):495–526. DOI: <https://doi.org/10.1080/07060661.2020.1861102>
6. Yao J., Ma H., Lu W. Progress on inheritance and breeding for wheat scab resistance in JAAS. *Cereal Research Communications*. 2008;36:189–191.
7. Lugovtsova S. Yu., Stupko V. Yu., Neshumaeva N. A. Effect of culture filtrates of *Fusarium* fungi on oat callus cultures. *Sibirskiy vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki* = Siberian Herald of Agricultural Science. 2023;53(10):15–22. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2023-10-2>
8. Eudes F., Badea A., Laroche A., Gaudet D., Graf R., Sadasivaiah S. In vitro selection and molecular markers for early screening of Fusarium head blight resistance wheat. In: Xu Z., Li J., Xue Y., Yang W. (eds) *Biotechnology and Sustainable Agriculture 2006 and Beyond*. Springer, Dordrecht, 2007. pp. 349–352. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6635-1_56
9. Legge W. G., Tucker J. R., Bizimungu B., Tekauz A., Noll J. S., Fetch Jr. T. G., et al. Norman barley. *Canadian Journal of Plant Science*. 2011;91(6):1105–1113. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjps2010-020>
10. Legge W. G., Tucker J. R., Bizimungu B., Tekauz A., Fetch Jr. T. G., Haber S., et al. Taylor barley. *Canadian Journal of Plant Science*. 2013;93(5):969–977. DOI: <https://doi.org/10.4141/cjps2013-126>
11. Ryabova D., Randhawa H. S., Kathiria P., Jiang F., Spaner D., Hucl P., et al. Development of new wheat varieties resistant to FHB through microspore *in vitro* selection technology. *National Fusarium Head Blight Forum: proceedings*. St. Louis MO, United States, 2016. pp. 92.
12. Gosman N., Chandler E., Thomsett M., Draeger R., Nicholson P. Analysis of the relationship between parameters of resistance to Fusarium head blight and in vitro tolerance to deoxynivalenol of the winter wheat cultivar WEK0609. *European Journal Plant Pathology*. 2005;111(1):57–66. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10658-004-2733-8>
13. Zhang Y. P., Jiang S., Qu S. P., Yang X. M., Wang X. N., Ma L. L., et al. In vitro selection for *Fusarium* resistant oriental lily mutants using culture filtrate of the fungal agent. *Acta Horticulturae*. 2014;1027:205–212. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1027.22>
14. Shaunak I., Sharma R., Sharma P., Gupta M., Bhardwaj R. K. Developing resistance against soil-borne *Fusarium* pathogen causing tomato wilt through in vitro cell line selection. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2023;153:91–104. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11240-023-02446-1>
15. Kuanar A., Nayak P. K., Subudhi E., Nayak S. In vitro selection of turmeric somaclone resistant to *Fusarium oxysporum* f. sp. *Zingiberi*. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*. 2014;84:1077–1082. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40011-013-0295-2>
16. Tagimanova D. S., Rashidenova Zh. A., Khapilina O. N. Screening of the resistant pea callus (*Pisum sativum* L.) selective media, containing *Fusarium oxysporum* L. culture filtrate. *Biotehnologiya. Teoriya i praktika*. 2013;(3):55–60. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25612905>
17. Borrás O., Bermudez R. S. The pineapple-Fusarium subglutinans interaction: an early selection system for disease resistance. In Book: *Mass screening techniques for selecting crops resistant to disease*. FAO/IAEA (eds). Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010. pp. 159–172.
18. Terletskaya N. V., Stupko V. Yu., Iskakova A. B., Zobova N. V., Gaevskiy N. A. Photomorphogenesis of wheat embryogenic calli under edaphic stress conditions. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN* = Proceedings of the RAS Ufa Scientific Centre. 2018;(3-5):43–51. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36293992>

19. Yerzhebayeva R. S., Abekova A. M., Bersimbaeva G. H., Konysbekov K. T., Bastaubaeva S. O., Roik N. V., Urazaliev K. R. *In Vitro* Cell Selection of Sugar Beet for Resistance to Culture Filtrate of the Fungus *Fusarium oxysporum*. Cytology and Genetics. 2019;53:307–314. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0095452719040042>

20. Baymukhametova E. A., Kuluev B. R. Darkening of plant tissues during *in vitro* cultivation and methods for its prevention. *Biotehnologiya*. 2020;36(2):26–42. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21519/0234-2758-2020-36-2-26-42>

Сведения об авторах

✉ **Ступко Валентина Юрьевна**, кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физиологии и биотехнологии, Красноярский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное подразделение ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», проспект Свободный, д. 66, г. Красноярск, Российская Федерация, 660041, e-mail: fic@ksc.krasn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4430-2719>, e-mail: stupko@list.ru

Луговцова Светлана Юрьевна, старший научный сотрудник лаборатории физиологии и биотехнологии, Красноярский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное подразделение ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», проспект Свободный, д. 66, г. Красноярск, Российская Федерация, 660041, e-mail: fic@ksc.krasn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4185-9455>

Нешумаева Надежда Алексеевна, кандидат биол. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физиологии и биотехнологии, Красноярский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – обособленное подразделение ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», проспект Свободный, д. 66, г. Красноярск, Российская Федерация, 660041, e-mail: fic@ksc.krasn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7314-9418>

Information about the authors

✉ **Valentina Yu. Stupko**, PhD in Agricultural Science, leading researcher, the Laboratory of Physiology and Biotechnology, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Krasnoyarsk Research Institute of Agriculture, Svobodny prospect, 66, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660041, e-mail: fic@ksc.krasn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4430-2719>, e-mail: stupko@list.ru

Svetlana Yu. Lugovtsova, senior researcher, the Laboratory of Physiology and Biotechnology, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Krasnoyarsk Research Institute of Agriculture, Svobodny prospect, 66, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660041, e-mail: fic@ksc.krasn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4185-9455>

Nadezhda A. Neshumaeva, PhD in Biological Science, leading researcher, the Laboratory of Physiology and Biotechnology, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Krasnoyarsk Research Institute of Agriculture, Svobodny prospect, 66, Krasnoyarsk, Russian Federation, 660041, e-mail: fic@ksc.krasn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7314-9418>

✉ – Для контактов / Corresponding author

КОРМОПРОИЗВОДСТВО: ПОЛЕВОЕ И ЛУГОВОЕ / FODDER PRODUCTION: FIELD AND MEADOW

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.141-149>

УДК 636.085.33



Перспективы использования надземной биомассы тростника южного (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex. Steud.) в технологиях кормопроизводства

© 2025. С. А. Давыдова¹, А. И. Ряднов², А. О. Тишанинова¹, Т. В. Ананьева¹✉

¹ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», г. Волгоград, Российская Федерация

Для повышения эффективности кормопроизводства регионов России, где наблюдается дефицит атмосферного увлажнения почвы и неустойчивые погодные условия, необходимо разработать комплекс мероприятий по получению высокопитательных кормов на основе рационального использования местных растительных ресурсов, которые в конкретных почвенно-климатических условиях обеспечивают наибольший выход продукции с единицы площади. С 2021 по 2023 год изучали естественный фитоценоз тростника южного в пойме реки Волга на территории Труссовского района Астраханской области: морфобиологические особенности в разные фазы развития; динамику накопления сырой и сухой надземной биомассы; урожайность, кормовую ценность и белковую продуктивность сухой надземной биомассы в фазу максимального ее накопления. Установлено, что в условиях аридного климата (ГТК – 0,45–0,46) за счет использования грунтовых вод урожайность сырой и сухой надземной биомассы тростника южного достигала: в фазу «выход в трубку» – 19,0 и 5,1 т/га, в фазу «выметывание» – 22,8 и 7,2 т/га, в фазу «полная спелость» – 38,4 и 8,2 т/га соответственно. Сбор кормовых единиц по фазам роста и развития составил 2,24; 3,39; 3,61 т/га, содержание белка – 4,5; 10,0; 11,0 %, сбор белка с урожаем – 0,20; 0,77; 0,91 т/га, содержание сырой клетчатки – 13,6; 30,1; 36,0 %, сбор сырой клетчатки – 0,69; 2,32; 2,95 т/га соответственно. Тростник южный в фазе «полная спелость» содержал полный набор протеиногенных аминокислот, при этом доля незаменимых аминокислот превышала долю заменимых в 1,32 раза, что нетипично для злаковых культур. Значительное содержание критических аминокислот (10,6 %) делает тростник южный перспективным источником белка, сопоставимым с зернобобовыми культурами. Выявлено, что по урожайности, кормовой ценности и белковой продуктивности тростник южный (сырая и сухая надземная биомасса) представляет несомненный интерес как кормовая культура и должен быть вовлечен в технологии отечественного кормопроизводства с целью создания прочной кормовой базы.

Ключевые слова: урожайность, кормовая культура, сырой жир, сырая клетчатка, кормовая единица, незаменимые аминокислоты, критические аминокислоты, заменимые аминокислоты

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № FGUN-2022-0026).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Давыдова С. А., Ряднов А. И., Тишанинова А. О., Ананьева Т. В. Перспективы использования надземной биомассы тростника южного (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex. Steud.) в технологиях кормопроизводства. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(1):141–149. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.141-149>

Поступила: 26.07.2024

Принята к публикации: 28.01.2025

Опубликована онлайн: 26.02.2025

Prospects for the use of the aboveground biomass of southern cane (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex. Steud.) in feed production technologies

© 2025. Svetlana A. Davydova¹, Aleksey I. Ryadnov², Anastasia O. Tishaninova¹, Tatiana V. Ananeva¹✉

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

²Volgograd State Agricultural University, Volgograd, Russian Federation

To increase the efficiency of feed production in Russian regions where there is a shortage of atmospheric soil moisture and unstable weather conditions, it is necessary to develop a set of measures to obtain highly nutritious feeds based on the rational use of local plant resources, which in specific soil and climatic conditions provide the highest output per unit area.

From 2021 to 2023, the natural phytocenosis of the southern cane in the floodplain of the Volga River in the Trusovsky district of the Astrakhan region was studied: morphobiological features in different phases of development; dynamics of accumulation of raw and dry aboveground biomass; yield, feed value and protein productivity of dry aboveground biomass in the phase of its maximum accumulation. It was found that in an arid climate ($HTC = 0.45-0.46$) due to the use of groundwater, the yield of raw and dry aboveground biomass of the southern cane reached: in the «shooting» phase – 19.0 and 5.1 t/ha, in the «earring» phase – 22.8 and 7.2 t/ha, in the «full ripeness» phase – 38.4 and 8.2 t/ha, respectively. The collection of feed units by growth and development phases amounted to 2.24; 3.39; 3.61 t/ha, protein content – 4.5; 10.0; 11.0 %, protein harvest – 0.20; 0.77; 0.91 t/ha, crude fiber content – 13.6; 30.1; 36.0 %, crude fiber harvest – 0.69; 2.32; 2.95 t/ha, respectively. Southern cane in the full ripeness phase contains a complete set of proteinogenic amino acids, while the proportion of essential amino acids exceeds the proportion of non-essential amino acids by 1.32 times, which is atypical for cereals. The significant content of critical amino acids (10.6 %) makes it a promising protein source comparable to legumes. It has been revealed that in terms of yield, feed value and protein productivity, southern cane (raw and dry aboveground biomass) is of undoubted interest as a fodder crop and should be involved in domestic feed production technologies in order to create a solid feed base.

Keywords: yield, fodder crop, crude protein, crude fat, crude fiber, feed unit, essential amino acids, critical amino acids, non-essential amino acids

Acknowledgements: 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 Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. FGUN-2022-0026).

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

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

For citations: Davydova S. A., Ryadnov A. I., Tishaninova A. O., Ananeva T. V. Prospects for the use of the aboveground biomass of southern cane (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex. Steud.) in feed production technologies. Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):141–149. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.141-149>

Received: 26.07.2024

Accepted for publication: 28.01.2025

Published online: 26.02.2025

Тростник южный – *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex. Steud. – семейства Мятликовые (*Poaceae* L.) – высокорослое многолетнее прибрежно-водное травянистое растение корневищного типа с мощными, толстыми и длинными (до 200 см) подземными и надземными сильно разветвленными побегами-корневищами, проникающими в почву на глубину до 300 см.

Стебель тростника – полая, гладкая, упругая, сильно облиственная соломина диаметром до 1 см, высотой до 500 см. Листья – сидячие, ланцетно-линейные, суживающиеся к концу, заостренные, плоские, жесткие, по краю шероховатые, шириной от 5 до 25 мм, длиной – до 50 см, всегда поворачивающиеся ребром к ветру. Соцветие – густая развесистая поникающая метелка, длиной до 50 см с темно-бурыми, фиолетовыми, реже желтоватыми колосками, около 1 см в длину, содержащими от трех до семи цветков, из которых нижние мужские, остальные обоеполые, опыляемые ветром. Колосковые чешуйки разной длины – от 2,5 до 5,0 мм, при этом нижние вдвое короче верхних. Ось колоска под цветками волосистая, поэтому кисть пушистая. Цветёт тростник южный с июля по сентябрь. Плод – продолговатая зерновка, в одной метелке насчитывается от 50 до 100 тыс. семян. Семена созревают неравномерно в августе-сентябре, сохраняют

жизнеспособность не более 1 года, прорастают с поверхности почвы или глубины не более 1,0 см. Минимальная температура прорастания семян 8–10 °С, оптимальная – 18–20 °С. Для вида характерна полиплоидия. Хромосомный набор в популяции может варьировать от $2n = 36$ до $2n = 48$, или 96, чем и объясняется гигантизм растений¹.

Тростник южный – растение космополит, зимостойкое, холодостойкое, устойчивое к заморозкам, встречается почти на всей территории бывшего СССР, распространён также в Западной Европе, Азии, Северной Африке, в Северной и Южной Америке. Произрастает, главным образом, в низовьях рек, по берегам озёр, прудов, на заливных лугах, заболоченных местах, плавнях. Стебли обычно погружены в воду на 20–50 см, иногда до 1 м и более. Образует значительные по площади заросли (на десятках и сотнях гектаров) как чистые, так и двухъярусные с нижним ярусом из камыша².

Как злостный сорняк широко распространён на орошаемых землях, где засоряет все сельскохозяйственные культуры, но особенно рис, хлопчатник и люцерну. При этом встречается на суходолах при условии близкого залегания грунтовых вод, хорошо адаптирован к высокому уровню их минерализации и засолению. Благодаря высокой пластичности вида

¹Губанов И. А., Киселёва К. В., Новиков В. С., Тихомиров В. Н. Иллюстрированный определитель растений Средней России: в 3 т. Т. 1: Папоротники, хвощи, плауны, голосеменные, покрытосеменные (однодольные). М.: Товарищество науч. изд. КМК: Ин-т технол. исслед., 2002. С. 285. URL: <https://djvu.online/file/DjAgUO6OnSIYv>

²Никитин В. В. Сорные растения флоры СССР. Л.: Наука – Ленинградское отделение, 1983. 454 с.

его ареал огромен, а урожайность зеленой массы достигает до 40–100 т/га. Только в Волго-Ахтубинской пойме площадь промысловых зарослей тростника южного составляет 10 тыс. га при средней урожайности 4,5–7,5 т/га [1].

Традиционно тростник южный в местах его произрастания используют для изготовления стройматериалов, бумаги, биотоплива, а также в качестве лекарственного сырья. Отвар его корневищ или молодых стеблей и листьев используют как потогонное и мочегонное средство, молодые побеги – для изготовления витаминных экстрактов, а также употребляют в пищу в сыром и вареном виде [2].

Работы по изучению кормовой ценности надземной биомассы тростника южного успешно ведутся в Республике Казахстан, Латвии, Японии, Египте и других странах [3, 4, 5], однако в России кормовые достоинства культуры недооценены, и до сих пор не обозначен вектор его использования в технологиях кормопроизводства [6, 7]. На основании анализа литературных данных установлено применение тростника южного в целях очистки водных объектов, где его листостебельная биомасса используется в качестве природного сорбента для удаления сложных углеводов и других загрязнений [8, 9]. Практически отсутствует информация, характеризующая биохимический состав надземной биомассы, в том числе с учетом динамики ее формирования и почвенно-климатических условий зоны произрастания. Поэтому для полного понимания потенциала тростника необходимы дальнейшие исследования, хотя начальные региональные изыскания применения биомассы для зимней заготовки в Нижнем Поволжье указывают на его возможное использование в этом регионе [10].

Цель исследования – определить биометрические параметры, урожайность, белковую и кормовую ценность надземной биомассы тростника южного в пойме реки Волги в условиях Трусковского района Астраханской области.

Задачи исследований:

1. Изучить морфобиологические особенности тростника южного в разные фазы развития.
2. Изучить динамику накопления сырой и сухой надземной биомассы тростника южного.
3. Определить урожайность, кормовую ценность, белковую продуктивность сухой надземной биомассы тростника южного в фазу максимального ее накопления.

Научная новизна – комплексная оценка кормового потенциала тростника южного, произрастающего в естественных фитоценозах поймы реки Волги на территории Трусковского района Астраханской области.

Материал и методы. Исследования проводили в период с 2021 по 2023 год в пойме реки Волги в Трусковском районе Астраханской области в соответствии с общепринятой методикой³.

Почва исследуемого участка аллювиальная луговая, тяжелосуглинистая с содержанием гумуса – 4,5 % (по Тюрину) при уровне залегания грунтовых вод 1,5–2,0 м [11].

В среднем за годы исследований сумма активных температур за вегетационный период составила 3500 °С, сумма осадков – 210 мм, гидротермический коэффициент увлажнения Г. Т. Селянинова (ГТК) варьировал в пределах от 0,4 до 0,6, то есть осадки не обеспечивали достаточный уровень увлажнения.

Продуктивность агроценоза определяли в фазы «выход в трубку», «выметывание» и «полная спелость» методом учетных площадок⁴.

Биохимический анализ надземной биомассы проводили в ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»: содержание абсолютно сухого вещества находили в соответствии с ГОСТ 31640-2112⁵; сырого белка – по ГОСТ 32044.1-2012⁶; сырого жира – по ГОСТ 13496.15-2016⁷; сырой клетчатки – по ГОСТ 31675-212⁸. Аминокислотный состав белка определяли на установке NIR-42.

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

⁴Парахин Н. В., Кобозев И. В., Горбачев И. В., Лазарев Н. Н., Михалев С. С. Кормопроизводство. М.: Бибком, 2015. 384 с.

⁵ГОСТ 31640-2012. Корма. Методы определения содержания сухого вещества. (Издание с поправкой).

М.: Стандартинформ, 2020. 11 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095394?section=text>

⁶ГОСТ 32044.1-2012. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Определение массовой доли азота и вычисление массовой доли сырого протеина. Часть 1. Метод Кьельдаля. М.: Стандартинформ, 2014. 15 с.

URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200105311?section=text>

⁷ГОСТ 13496.15-2016. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения массовой доли сырого жира. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200140598?section=text>

⁸ГОСТ 31675-2012. Корма. Методы определения содержания сырой клетчатки с применением промежуточной фильтрации. М.: Стандартинформ, 2014. 12 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200097397?section=text>

Результаты и их обсуждение. Исследования показали, что в среднем за годы изучения продолжительность вегетационного периода у тростника южного в пойме реки Волги в условиях Трусовского района Астраханской области составила 112 суток при сумме активных температур за вегетацию 3500 °С; период от начала весеннего отрастания до фазы выхода в трубку – 23 дня при сумме активных температур 719 °С; период до фазы выметывания – 57 суток и сумме активных температур 1718 °С.

Высота растений к фазе полной спелости достигала 267 см (табл. 1). Наиболее интенсивный рост растений наблюдался в период

от фазы выхода в трубку до фазы выметывания, когда высота растений за 32 дня увеличилась на 165 см, или в 3,9 раза, а суточный прирост составил 5,2 см. При этом увеличение высоты растений происходило за счет увеличения как числа междоузлий (с 19 до 22 шт.), так и их длины (с 3 до 10 см). После выметывания рост растений замедлялся и суточный прирост не превышал 0,8 см, главным образом за счет увеличения длины междоузлий, что характерно для злаков, у которых рост междоузлий продолжается даже после формирования за счет интенсивного деления клеток в их основаниях.

Таблица 1 – Морфобиологическая характеристика фитоценоза тростника южного по фазам роста и развития в пойме реки Волги на территории Трусовского района Астраханской области (в среднем за 2021–2023 гг.) /

Table 1 – Morphological and biological characteristics of the phytocenosis of the southern cane by phases of growth and development in the floodplain of the Volga River in the territory of the Trusovsky district, Astrakhan region (on average for 2021–2023)

<i>Показатель / Indicator</i>	<i>Выход в трубку / Shooting</i>	<i>Выметывание / Earing</i>	<i>Полная спелость / Full ripeness</i>
Продолжительность вегетации от начала весеннего отрастания, сутки / The duration of vegetation from the beginning of spring regrowth, days	23	55	112
Сумма активных температур за период от начала весеннего отрастания, °С / The sum of active temperatures for the period from the beginning of spring regrowth, °C	719	1718	3500
Высота растений, см / Plant height, cm	57	222	267
Число междоузлий, шт. / Number of internodes, pcs.	19	22	22
Средняя длина междоузлия, см / The average length of the internode, cm	3	10	12
Площадь листовой поверхности, тыс. м ² /га / The area of the leaf surface, thousand m ² /ha	24,8	33,2	44,2
Фотосинтетический потенциал агроценоза, тыс. м ² × суток/га / Photosynthetic potential of agrocenosis, thousand m ² × days/ha	298	913	2475

По мере увеличения высоты растений возрастала площадь листовой поверхности, которая в фазу выхода в трубку составила 24,8 тыс. м²/га, в фазу выметывания – 33,2 тыс. м²/га, в фазу полной спелости – 44,2 тыс. м²/га, то есть листья перекрывали почву в 2,48; 3,32 и 4,42 раза соответственно. В результате величина фотосинтетического потенциала посева (произведение средней за учетный период площади листьев на продолжительность их функционирования) в фазу выхода в трубку составила 298 тыс. м² × суток/га, в фазу выметывания – 913 тыс. м² × суток/га и в фазу полной спелости – 2475 тыс. м² × суток/га. Примечательно, что листья тростника

южного продолжают расти и сохраняются на стебле до полного созревания семян.

Исследования показали, что в Трусовском районе Астраханской области в пойме реки Волги заросли тростника южного обеспечивают высокую урожайность сырой и сухой надземной биомассы (табл. 2, рис. 1). В фазу выхода в трубку урожайность сырой надземной биомассы достигала 19,0 т/га, сухой – 5,1 т/га, в фазу выметывания соответственно 22,8 и 7,7 т/га, или в 1,20 раза больше, в фазу полной спелости – 38,4 и 8,2 т/га, или больше в 2,02 раза, при этом сбор кормовых единиц по фазам составил 2,24 т/га, 3,39 и 3,61 т/га соответственно.

Таблица 2 – Продуктивность, белковая и кормовая ценность надземной биомассы тростника южного по фазам роста и развития на территории Трусовского района Астраханской области (в среднем за 2021–2023 гг.) /

Table 2 – Productivity, protein and feed value of aboveground biomass of southern cane by growth and development phases in the territory of the Trusovsky district, Astrakhan region (average for 2021–2023)

Показатель / Indicator	Выход в трубку / Shooting	Выме- тывание / Earing	Полная спелость / Full ripeness	HCP ₀₅ / LSD ₀₅
Урожайность сырой надземной биомассы, т/га / Yield of crude aboveground biomass, t/ha	19,0	22,8	38,4	1,34
Урожайность сухой надземной биомассы, т/га / Productivity of dry aboveground biomass, t/ha	5,10	7,70	8,20	0,35
Сбор кормовых единиц, т/га / Collection of feed units, t/ha	2,24	3,39	3,61	0,15
Содержание сырого белка, % ACB / Crude protein content, % DIA	3,90	10,00	11,00	0,41
Сбор сырого белка с урожаем сухой надземной биомассы, т/га / Collection of raw protein with a harvest of dry aboveground biomass, t/ha	0,20	0,77	0,90	0,03
Содержание сырого жира, % ACB / Crude fat content, % DIA	2,50	2,70	3,00	0,14
Сбор сырого жира с урожаем сухой надземной биомассы, т/га / Collection of crude fat with a harvest of dry aboveground biomass, t/ha	0,13	0,21	0,25	0,01
Содержание сырой клетчатки, % ACB / Crude fiber content, % ACB	13,6	30,1	36,0	1,33
Сбор сырой клетчатки с урожаем сухой надземной биомассы, т/га / Collection of crude fiber with a harvest of dry aboveground biomass, t/ha	0,69	2,32	2,95	0,10

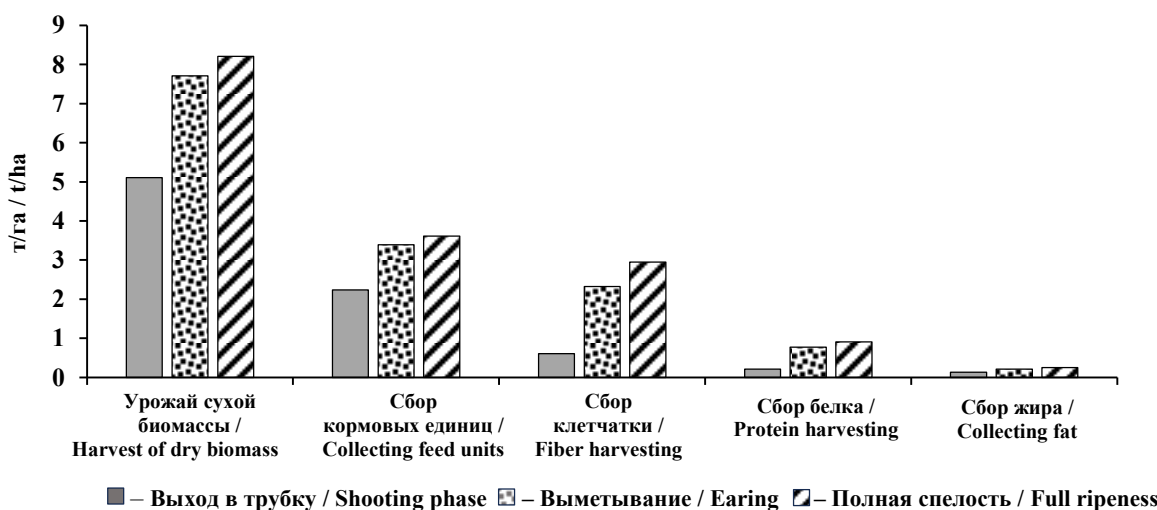


Рис. 1. Динамика формирования элементов продуктивности и кормовой ценности надземной биомассы тростника южного по фазам роста и развития в пойме реки Волги на территории Трусовского района Астраханской области (в среднем за 2021–2023 гг.) /

Fig. 1. Dynamics of the formation of elements of productivity and feed value by aboveground biomass of southern cane by phases of development in the floodplain of the Volga River in the territory of the Trusovsky district, Astrakhan region (on average for 2019–2023)

Содержание сырого белка в сухой надземной биомассе увеличивалось по мере роста и развития растений от 3,9 % в фазу выхода

в трубку до 10,0 % в фазу выметывания и до 11,0 % в фазу полной спелости.

Примечательно, что по содержанию сырого белка в фазы выметывания и выхода в трубку сухая надземная биомасса тростника южного не уступала зерну некоторых зерновых хлебов, таких как рожь (9,9 %), ячмень (10,1 %), овес (10,0 %), кукуруза (11,0 %)⁹.

Сбор сырого белка с урожаем сухой надземной биомассы в фазу выхода в трубку составил 0,20 т/га, в фазу выметывания – 0,77 т/га, в фазу полной спелости – 0,90 т/га, что сопоставимо с выходом белка с единицы площади, даже у зерновых бобовых культур, таких как горох посевной, чечевица посевная, вика посевная и других.

Содержание сырого жира в сухой надземной биомассе невысоко и варьировало по фазам развития в пределах от 2,50 до 3,00 %, однако, за счет высокой урожайности его сбор с единицы площади составил 0,13–0,25 т/га, что также сопоставимо с выходом сырого жира

с урожаем семян ряда зерновых и зерновых бобовых культур (табл. 2, рис. 1).

Сырая клетчатка является контролируемым показателем в кормлении животных, так как её дефицит в корме вызывает ряд негативных последствий (особенно у жвачных), а избыток снижает питательную ценность кормов, то есть существует оптимум ее содержания. Установлено высокое содержание клетчатки в сухой надземной биомассе тростника южного во все фазы развития. Оно возрастает от фазы выхода в трубку до фазы полной спелости с 13,6 до 36,0 %, сбор сырой клетчатки с урожаем сухой надземной биомассы с 0,69 до 2,95 т/га.

Анализ аминокислотного состава белка надземной биомассы тростника южного, убранного в фазу полной спелости, показал (табл. 3, рис. 2), что в нем присутствуют все известные протеиногенные (участвующие в синтезе белковых молекул) аминокислоты.

Таблица 3 – Соотношение незаменимых и заменимых аминокислот в белке надземной биомассы тростника южного в фазу полной спелости в пойме реки Волги на территории Трусовского района Астраханской области (в среднем за 2021–2023 гг.) /

Table 3 – The ratio of essential and non-essential amino acids in the protein of the aboveground biomass of southern cane in the phase of full ripeness in the floodplain of the Volga River in the territory of the Trusovsky district, Astrakhan region (on average for 2019–2023)

Незаменимые аминокислоты / Essential amino acids	Содержание в белке, мг/100 г / Protein content, mg/100 g	Заменимые аминокислоты / Non-essential amino acids	Содержание в белке, мг/100 г / Protein content, mg/100 g
Гистидин / Histidine	66	Цистеин / Cysteine	38
Метионин / Methionine	83	Тирозин / Tyrosine	135
Триптофан / Tryptophan	133	Серин / Serin	209
Фенилаланин / Phenylalanine	206	Глицин / Glycine	222
Лизин / Lysine	225	Аспарагиновая кислота + аспарагин / Aspartic acid + asparagine	240
Треонин / Threonine	226	Пролин / Proline	282
Валин / Valin	231	Аланин / Alanin	335
Лейцин + изолейцин / Leucine + isoleucine	512	Глутаминовая кислота + глутамин / Glutamic acid + glutamine	364
Аргинин / Arginine	616	-	-
Сумма незаменимых / The sum of the essential	2298	Сумма заменимых / The sum of the non-essential	1825
Сумма критических (лизин, метионин, триптофан) / The sum of the critical (lysine, methionine, tryptophan)	441	-	-
Отношение незаменимых к заменимым / The ratio of the essential to the non-essential	1,26		

⁹Сальников А. Л., Сугралиева З. Б., Давыдова С. А., Еремина А. Н. Кормовая смесь на основе тростника южного для карповых рыб: пат. №2559114 Российская Федерация. №2012139380/13: заявл. 13.09.2012; опубл. 10.08.2015. Бюл. №22. 5 с. URL: <https://patenton.ru/patent/RU2559114C2.pdf>

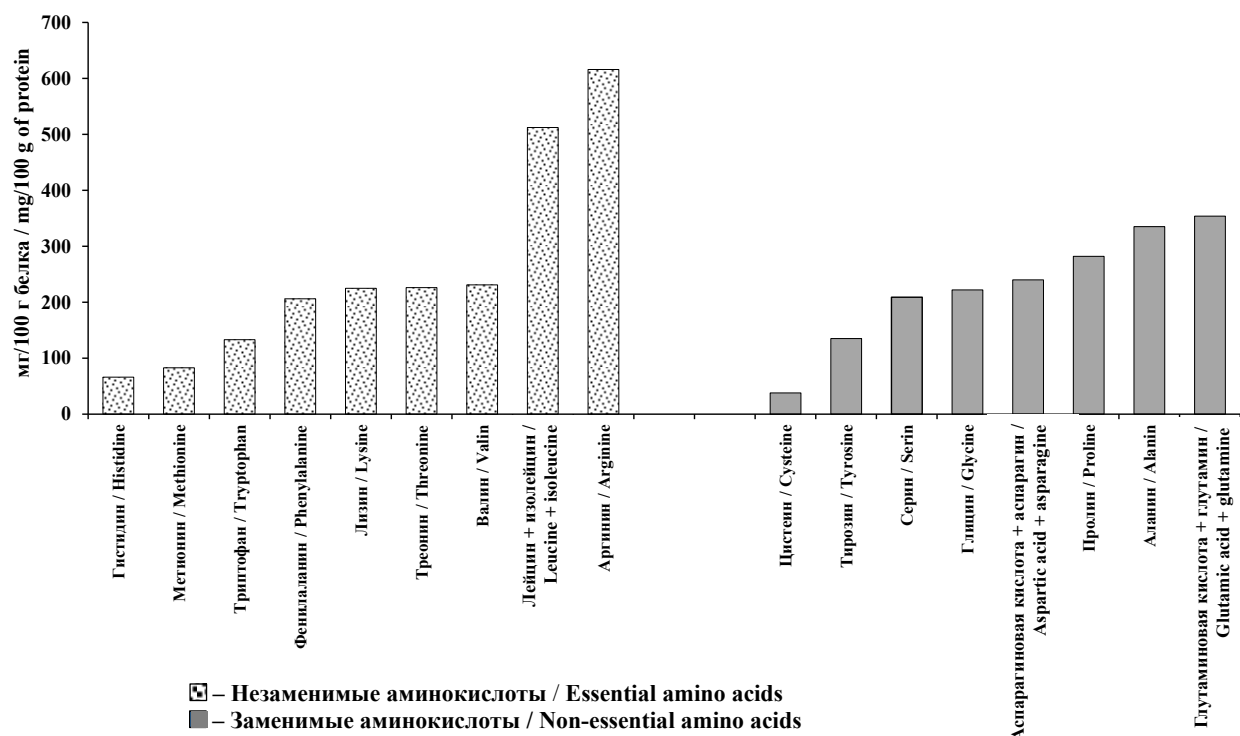


Рис. 2. Аминокислотный состав белка надземной биомассы тростника южного в фазу полной спелости в пойме реки Волги в условиях Трусовского района Астраханской области, мг/100 г белка (в среднем за 2021–2023 гг.) /

Fig. 2. Amino acid composition of protein of aboveground biomass of southern cane in the full ripeness phase in the floodplain of the Volga River in the conditions of the Trusovsky district Astrakhan region, mg/100 g of protein (on average for 2021–2023)

Примечательно, что 55,7 % среди всех входящих в состав белка аминокислот составляют наиболее ценные, не синтезируемые организмом животного и человека, незаменимые аминокислоты. Их доля в белке надземной биомассы тростника южного в 1,32 раза больше, чем заменимых, что нетипично для злаков и характерно для бобовых высокобелковых культур.

Доля критических аминокислот, наиболее часто находящихся в дефиците, таких как лизин, метионин, триптофан, в белке сухой надземной биомассы тростника южного достигала 10,6 %, что эквивалентно содержанию критических аминокислот в белке семян зерновых бобовых культур, гороха, вики посевной и других¹⁰.

Закключение. Тростник южный, произрастающий в естественных фитоценозах в пойме реки Волги на территории Трусовского района Астраханской области, по урожайности, кормовой ценности, белковой продуктивности, аминокислотному составу белка,

содержанию и сбору клетчатки представляет несомненный интерес как кормовая культура и должен быть вовлечен в технологии отечественного кормопроизводства с целью создания прочной кормовой базы на основе использования его природных фитоценозов. Урожайность биомассы достигает высоких значений, особенно в фазе полной спелости (сырой массы – 38,4 т/га, сухой массы – 8,2 т/га, кормовых единиц – 3,61 т/га).

В фазы выметывания и полной спелости содержание сырого белка в сухой надземной биомассе достигало 10,0–11,0 %, что сопоставимо с содержанием белка у ряда зерновых хлебов, таких как рожь (9,9 %), ячмень (10,1 %), овес (10,0 %), кукуруза (11,0 %) и других. По сбору сырого белка с урожаем (в фазу выметывания – 0,77 т/га, в фазу полной спелости – 0,91 т/га) тростник южный не уступал таким зерновым бобовым, как горох посевной, чечевица посевная, вика посевная и другим культурам.

¹⁰Белышкина М. Е. Биология и морфология полевых культур: учебное пособие. Иркутск: ООО «Мегапринт», 2018. 139 с.

В составе белка надземной биомассы в фазу полной спелости преобладали незаменимые аминокислоты (в 1,32 раза больше, чем заменимых), при этом доля критических аминокислот в их составе достигает 10,0-11,0 %, что также приближает его к белку зерновых культур.

Во все фазы развития в сухой надземной биомассе тростника южного выявлено высокое содержание сырой клетчатки (13,6–36,0 %), сбор которой с урожаем сухой надземной биомассы варьировал от 0,69 т/га в фазу выхода в трубку до 2,95 т/га в фазу полной спелости.

Список литературы

1. Соколов Н. А., Костин В. Е., Васенев И. И., Ерошенко В. И. Экологически обоснованное управление биомассой тростника южного на территории Волго-Ахтубинской поймы. Социально-экологические технологии. 2021;11(2):215–229. DOI: <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2021-11-2-215-229> EDN: YWRAIX
2. Давыдова С. А., Тишанинова А. О. Состояние и перспективы развития производства кормов для животноводства в регионах Поволжья. Техника и технологии в животноводстве. 2022;(4(48)):42–50. DOI: <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-4-42> EDN: LCMPDO
3. Asano K., Nakamura R., Araie A., Koike R., Takahashi K., Madachi T., Ishida M. Effects of year and harvest time within the year on yield and chemical composition of common reed (*Phragmites communis Trin.*) as ruminant feed. Grassland Science. 2015;61(1):1–5. DOI: <https://doi.org/10.1111/grs.12067>
4. Smits M., Kronbergs E. Experimental investigation of shredder cutter head vibration parameters. Engineering for Rural Development. 2015;14:290–294. URL: https://www.iitf.lbtu.lv/conference/proceedings2015/Papers/047_Smits.pdf
5. El-Talty Y. I., Abdel-Gwad M. H., Mahmoud A. E. M. Effect of common reed (*Phragmites australis*) silage on performance of growing lambs. Asian Journal of Animal Sciences. 2015;9(1):1–12. DOI: <https://doi.org/10.3923/ajas.2015.1.12>
6. Керимов М. А., Иванов Д. В. Биоэнергетическая модель растительного сырья и оценка технологий производства кормов. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023;17(1):51–61. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-51-61> EDN: HSQHVC
7. Ранта-Корхонен Т., Маркова М. В., Васильев Э. В., Оглуздин А. С., Васильева Н. С. Результаты исследования качества воды в рамках международного проекта ЛУГА–БАЛТ–2. Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021;15(3):4–12. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-3-4-12> EDN: WOBLL
8. Соколова Н. А., Хлобжева И. Н., Васенев И. И., Костин В. Е., Кочетков В. Г., Гамага В. В. Перспективы использования листостебельной биомассы тростника южного для очистки водных объектов. АгроЭко-Инфо. 2022;(4(52)):5. DOI: <https://doi.org/10.51419/202124433> EDN: WXDNHQ
9. Давыдова Е. В., Ким А. Н., Джигола Л. А., Капизова А. М. Некоторые аспекты исследования природного сорбента на основе тростника южного обыкновенного в практике очистки водных сред от сложных углеводородов. Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2019;(4(30)):25–29.
10. Соколова Н. А., Костин В. Е., Хлобжева И. Н., Гамага В. В., Васенев И. И. Функциональное использование биомассы тростника (*Phragmites Australis*) зимней заготовки в регионах Нижнего Поволжья. Проблемы региональной экологии. 2020;(5):25–30. DOI: <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2020-5-25-30> EDN: UAILSJ
11. Кутлусурина Г. В., Токарева Г. В. Почвенно-гидрологическая характеристика Астраханской области для обоснования мелиоративного районирования. Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2016;(2(22)):128–147. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26000948> EDN: VWZLKP

References

1. Sokolov N. A., Kostin V. E., Vasenev I. I., Eroshenko V. I. Environmentally sound management of common reed biomass in the Volga-Akhtuba floodplain. *Sotsial'no-ekologicheskie tekhnologii* = Environment and Human: Ecological Studies. 2021;11(2):215–229. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2021-11-2-215-229>
2. Davydova S. A., Tishaninova A. O. The state and prospects of animal feed production's development in Volga regions. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve* = Machinery and technologies in livestock. 2022;(4(48)):42–50. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51794/27132064-2022-4-42>
3. Asano K., Nakamura R., Araie A., Koike R., Takahashi K., Madachi T., Ishida M. Effects of year and harvest time within the year on yield and chemical composition of common reed (*Phragmites communis Trin.*) as ruminant feed. Grassland Science. 2015;61(1):1–5. DOI: <https://doi.org/10.1111/grs.12067>
4. Smits M., Kronbergs E. Experimental investigation of shredder cutter head vibration parameters. Engineering for Rural Development. 2015;14:290–294. URL: https://www.iitf.lbtu.lv/conference/proceedings2015/Papers/047_Smits.pdf
5. El-Talty Y. I., Abdel-Gwad M. H., Mahmoud A. E. M. Effect of common reed (*Phragmites australis*) silage on performance of growing lambs. Asian Journal of Animal Sciences. 2015;9(1):1–12. DOI: <https://doi.org/10.3923/ajas.2015.1.12>

6. Kerimov M. A., Ivanov D. V. Bioenergy Model of Plant Raw Materials and Assessment of Feed Production Technologies. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2023;17(1):51–61. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-51-61>
7. Ranta-Korhonen T., Markova M. V., Vasilev E. V., Ogluzdin A. S., Vasileva N. S. Results of the Water Quality Study Within the Luga–Balt–2 International Project. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2021;15(3):4–12. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-3-4-12>
8. Sokolova N. A., Khlobzheva I. N., Vasenev I. I., Kostin V. E., Kochetkov V. G., Gamaga V. V. Prospects for the use of leaf-stem biomass of the southern reed for the treatment of water bodies. *AgroEkoInfo*. 2022;(4(52)):5. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51419/20212443>
9. Davydova E. V., Kim A. N., Dzhigola L. A., Kapizova A. M. Some aspects of the study of a natural sorbent based on Southern cane in the practice of purifying aquatic environments from complex hydrocarbons. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya* = Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region. 2019;(4(30)):25–29. (In Russ.).
10. Sokolova N. A., Kostin V. E., Khlobzheva I. N., Gamaga V. V., Vasenev I. I. Functional use of winter harvesting reed biomass in the lower Volga regions. *Problemy regional'noy ekologii* = Regional Environmental Issues. 2020;(5):25–30. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2020-5-25-30>
11. Kutlusurina G. V., Tokareva G. V. Soil-hydrological characteristics of Astrakhan region for justification of land reclamation zoning. *Nauchnyy zhurnal Rossiyskogo NII problem melioratsii* = Scientific Journal of Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems. 2016;(2(22)):128–147. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26000948>

Сведения об авторах

Давыдова Светлана Александровна, кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1219-3335>

Ряднов Алексей Иванович, доктор с.-х. наук, профессор, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет», д. 26, Университетский пр-кт, г. Волгоград, Российская Федерация, 400002, e-mail: volgau@volgau.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2364-4944>

Тишанинова Анастасия Олеговна, младший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8619-8366>

✉ **Ананьева Татьяна Васильевна**, кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», 1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, Российская Федерация, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5047-7865>, e-mail: ananevatv7@yandex.ru

Information about the authors

Svetlana A. Davydova, PhD in Engineering, leading researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutsky proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1219-3335>

Aleksey I. Ryadnov, DSc in Agricultural Science, professor, Volgograd State Agricultural University, 400002, Russian Federation, Volgograd, Universitetskiy Ave., 26, e-mail: volgau@volgau.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2364-4944>

Anastasia O. Tishaninova, junior researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutsky proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8619-8366>

✉ **Tatiana V. Ananeva**, PhD in Agricultural Science, senior researcher, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutsky proezd, 5, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5047-7865>, e-mail: ananevatv7@yandex.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.150-157>

УДК 636.082:575.113.1

Частота распределения и связь полиморфизма молочных белков у голштинских быков с продуктивностью их матерей и оценкой по дочерям

© 2025. Л. И. Кузякина¹✉, Е. Н. Усманова¹, Е. А. Смирнов¹, Е. В. Мокерова²¹ФГБОУ ВО «Вятский государственный агротехнологический университет», г. Киров, Российская Федерация²АО «Кировплем», г. Киров, Российская Федерация

Гены каппа-казеина и бета-казеина контролируют удои, качество молока и молочных продуктов, поэтому они представляют собой важные селекционные критерии отбора для молочных пород крупного рогатого скота. У 68 быков-производителей голштинской породы импортной и отечественной селекции, принадлежащих предприятию АО «Кировплем» Кировской области, была изучена частота встречаемости разных генотипов по каппа- и бета-казеину, проанализированы данные молочной продуктивности их матерей и результаты оценки по дочерям. Установлено, что среди проверенных быков по каппа-казеину преобладал генотип AA – 50,0 % производителей. Генотипы AB и BB встречались у 30,9 и 19,1 % быков соответственно. Наибольшая продуктивность по удою, содержанию жира и белка в молоке (14573 кг, 4,39 и 3,47 % соответственно) получена от матерей быков с генотипом AB, при этом их превосходство статистически доказано по удою и содержанию белка по сравнению с матерями быков с генотипом AA. Относительно сверстниц также более продуктивными были дочери быков с генотипом AB, их прибавка по соответствующим показателям молочной продуктивности составила 720 кг, 0,21 %, 0,12 %, что достоверно выше по содержанию жира и белка в молоке в сравнении с генотипом AA. По бета-казеину преобладали быки, имеющие генотип A1A2 (51,5 %). Производителей с генотипом A1A1 и A2A2 выделено меньше соответственно 27,9 и 20,6 %. Наибольшие показатели по удою установлены у матерей быков с генотипом по бета-казеину A2A2 – 14482 кг. Достоверно более высокое содержание жира – 4,49 % у матерей быков с генотипом A1A2. Также достоверно большей белковостью молока (3,43 и 3,41 %) отличались матери быков с генотипами A1A1 и A1A2. Сравнение дочерей со сверстницами показало, что наибольшую прибавку в удое дали дочери от быков с генотипами A2A2 – 745 кг и A1A2 – 717 кг, что статистически достоверно, по МДЖ – дочери быков с генотипом A1A2 – 0,17 %, по белку – с генотипом A2A2 – 0,11 %. Для повышения молочной продуктивности и улучшения качества молока в среднем по стаду следует увеличивать количество животных от быков с данными генотипами каппа- и бета-казеина.

Ключевые слова: молочное скотоводство, голштинская порода, быки, каппа-казеин, бета-казеин.

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке ФГБОУ ВО «Вятский государственный агротехнологический университет» и АО «Кировплем» (г. Киров).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Кузякина Л. И., Усманова Е. Н., Смирнов Е. А., Мокерова Е. В. Распределение и взаимосвязь полиморфизма молочных белков у быков с продуктивностью их матерей и дочерей. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(1):150–157. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.150-157>

Поступила: 19.08.2024

Принята к публикации: 24.01.2025

Опубликована онлайн: 26.02.2025

Frequency of distribution and relationship of polymorphism of milk proteins in Holstein bulls with the productivity of their mothers and assessment of daughters

© 2025. Ludmila I. Kuzyakina¹✉, Elena N. Usmanova¹, Egor A. Smirnov¹, Elena V. Mokerova²¹Vyatka State Agrotechnological University, Kirov, Russian Federation,²Kirov Joint Stock Company for breeding work (AO Kirovplem), Kirov, Russian Federation

The kappa-casein and beta-casein genes control milk yield, quality of milk and dairy products, therefore they represent important breeding criteria for dairy cattle breeds. The frequency of occurrence of different kappa- and beta-casein genotypes was studied in 68 Holstein bulls of imported and domestic breeding owned by Kirovplem JSC of the Kirov region, data on the milk productivity of their mothers and the results of the evaluation of their daughters were analyzed. It was found that among the analyzed bulls for kappa casein, the AA genotype prevailed - 50.0 % of producers. The AB and BB genotypes were found in 30.9 and 19.1 % of bulls, respectively. The highest productivity according to yield, fat content and protein content in milk (14,573 kg, 4.39 and 3.47 %, respectively) was obtained from mothers of bulls with the AB genotype, while

their superiority in milk yield and protein content was statistically significant compared to mothers of bulls with the AA genotype. Relative to their peers, the daughters of bulls with the AB genotype were also more productive, their weight gain was 720 kg, 0.21 %, 0.12 %, which was significantly higher in fat and protein content in milk compared to the AA genotype. Beta-casein was dominated by bulls with the A1A2 genotype (51.5 %). There were fewer producers with the A1A1 and A2A2 genotypes, respectively – 27.9 and 20.6 %. The highest milk yield was found in mothers of bulls with the beta-casein A2A2 genotype – 14482 kg. Significantly higher fat content – 4.49 % in mothers of bulls with the A1A2 genotype. Mothers of bulls with casein A1A1 and A1A2 also have significantly higher milk protein content (3.43 and 3.41 %). A comparison of daughters with their peers showed that the greatest increase in milk yield was given to daughters from bulls with genotypes A2A2 – 745 kg and A1A2 – 717 kg, which was statistically significant, in mass fraction of fat – daughters of bulls with genotype A1A2 – 0.17 %, and in protein – with genotype A2A2 – 0.11 %. To increase milk productivity and improve the quality of milk in the average herd, the number of animals from bulls with these kappa- and beta-casein genotypes should be increased.

Keywords: dairy cattle breeding, Holstein breed, bulls, kappa casein, beta casein

Acknowledgements: the research was carried out under the financial support of the Vyatka State Agrotechnological University, Kirov Joint Stock Company for breeding work (AO Kirovplem), Kirov.

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

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

For citation: Kuzyakina L. I., Usmanova E. N., Smirnov E. A., Mokerova E. V. Frequency of distribution and relationship of polymorphism of milk proteins in Holstein bulls with the productivity of their mothers and assessment of daughters. *Agrarna-ya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):150–157. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.150-157>

Поступила: 19.08.2024

Принята к публикации: 24.01.2025 Опубликовано онлайн: 26.02.2025

На современном этапе развития скотоводства Российской Федерации одними из главных задач зоотехнической науки являются повышение молочной продуктивности коров и улучшение качественных составляющих молока [1, 2]. Решить эти задачи предусматривается за счет рационального использования генетических ресурсов животных с внедрением новейших методов популяционной генетики – маркерной селекции, ДНК-технологий [3, 4, 5], а также применения инноваций в области кормления и содержания для реализации высокого потенциала животных [6, 7].

С появлением геномного анализа было обнаружено большое разнообразие аллелей в шести основных локусах молочных белков. Генетический полиморфизм возникает из-за существования разных (полиморфных) аллелей в локусе гена. Различные типы белка, продуцируемые полиморфным геном, являются генетическими вариантами и различаются аминокислотной последовательностью. Знание вариантов многообразия молочного белка является полезным инструментом для характеристики пород, сохранения разнообразия популяций, а также производства продуктов для здорового питания человека. Обнаружено, что возникновение аллелей, связанных с пониженным содержанием различных казеинов, может быть использовано для производства молока с особыми питательными качествами, то есть гипоаллергенного молока. С другой стороны, частоту этих аллелей можно уменьшить путем отбора производителей с использованием ДНК-тестов, тем самым увеличивая содер-

жание казеина в молоке, используемом в сыроделии. Следовательно, генетические варианты вызывают большой интерес в молочной промышленности. Поскольку генетические варианты наследуются в соответствии с простым менделевским типом наследования, можно проводить селекцию для получения определенных вариантов молочных белков. Данная схема отбора практикуется в некоторых странах для поддержки более высоких частот казеина В и β -лактоглобулина. Так, вариант В из двух белков связан с более высоким уровнем жира и казеина в молоке, лучшими коагулирующими свойствами при сычужном образовании, более высоким выходом сыра и его качеством. Информация о генотипах важна для селекционеров, когда они хотят улучшить свои стада.

Гены каппа-казеина и бета-казеина контролируют удой, качество молока и молочных продуктов, поэтому они представляет собой важные селекционные критерии отбора для молочных пород крупного рогатого скота [8]. Аллельные варианты гена каппа-казеина отличаются нуклеотидными заменами в последовательности цепи ДНК, которые в ряде случаев приводят к изменению аминокислотной последовательности белка, и следовательно генетически обусловлены [9]. Исследованиями отечественных ученых, изучавших полиморфизм белков молока, установлено, что сыропригодность молока в определенной степени зависит от генотипа коров по каппа-казеину [10]. Некоторые генетические варианты молочных белков существенно влияют на молочную продуктивность, физико-химические и техно-

логические свойства молока, поэтому могут выступать в роли генетических маркеров [11]. Интерес вызывает определение взаимосвязей между показателями удоя, жира и белка у матерей и дочерей производителей с разным казеином, для того чтобы определить наиболее эффективные направления селекционно-племенной работы.

Цель исследования – определить частоту встречаемости и связь полиморфизма молочных белков у голштинских быков с продуктивностью их матерей и оценкой дочерей, выявить приоритетные генотипы быков для обоснованного подбора к стаду и в дальнейшем направленного отбора их потомков.

В связи с этим были поставлены следующие задачи: выявить у быков частоту встречаемости разных генотипов по фракциям казеина, изучить у матерей быков: удой, массовую долю жира и белка (МДЖ, МДБ), сумму молочного жира и молочного белка; используя имеющиеся результаты геномной оценки быков проанализировать превосходство дочерей над сверстницами по показателям продуктивности.

Научная новизна – определение генотипа по каппа-казеину и бета-казеину может быть тестом для уровня удоя и технологических свойств молока. Изучение молочной продуктивности коров-матерей и оценки дочерей голштинских быков во взаимосвязи с их генотипом по разным казеинам в условиях Кировской области ранее не проводили. Данные исследования являются важным аспектом для дальнейшего совершенствования маточного поголовья в регионе за счет обоснованного подбора быков и направленного отбора их потомков.

Материал и методы. Для достижения цели и задач были использованы основные данные молочной продуктивности матерей и имеющиеся результаты геномной оценки 68 быков голштинской породы, принадле-

жащих АО «Кировплем». Данные производители имеют разное происхождение – 24 быка из России (Московская, Ленинградская, Кировская, Свердловская, Новосибирская области), 11 быков из Канады, 10 быков из Дании, 10 быков из Нидерландов, 7 быков из Германии, 2 быка из США и 4 быка из Беларуси. При выполнении работы применяли общепринятые в зоотехнии методы исследования: расчетный, статистический, аналитический. При биометрической обработке данных применяли метод вариационной статистики с использованием программы Microsoft Excel. Достоверность разницы определяли по таблице Стьюдента (Н. А. Плохинский, 1969)¹.

Результаты и их обсуждение. По данным исследования, проведенного в Кировской области, у производителей голштинской породы преобладает генотип АА, его имеют 34 быка (или 50,0 %), генотип АВ встречается у 21 быка (или 30,9 %), генотип ВВ установлен у 13 голов (или 19,1 %). Такое распределение согласуется с данными других российских ученых, которые также отмечают, что животные в основном имеют генотип АА, менее распространенным является генотип ВВ [12].

Анализируя место рождения всех производителей, выявили, что на предприятии АО «Кировплем» преобладают быки голштинской породы импортного происхождения – 44 головы, или 64,7 %, в том числе из Беларуси 4 быка, или 5,9 %. Отечественных быков – всего 24 головы, или 35,3 % (табл. 1).

Половина быков с генотипом каппа-казеина АА отечественного происхождения, остальные импортного, в том числе 2 быка из Беларуси. Среди производителей с генотипом АВ преобладают импортные быки – 16 голов, или 76,2 %, в том числе 2 быка из Беларуси, российских быков всего – 5 голов, или 23,8 %.

Таблица 1 – Распределение быков голштинской породы в зависимости от их генотипа по каппа-казеину и происхождения /
Table 1 – Distribution of Holstein bulls depending on their kappa-casein genotype and origin

Показатель / Indicator	Генотип / Genotype		
	АА	АВ	ВВ
Количество голов / Number of heads	34	21	13
Удельный вес, % / Specific weight, %	50,0	30,9	19,1
Быки отечественного происхождения, голов / Bulls of domestic origin, heads	17	5	2
Быки импортного происхождения, голов / Bulls of imported origin, heads	17	16	11

¹Плохинский Н.А. Руководство по биометрии для зоотехников. М. «Колос», 1969. 256 с.

Производители с генотипом ВВ представлены в большинстве импортными быками – 11 голов, или 84,6 %, отечественных быков только 2 головы, или 15,4 %. Такое распределение генотипов по каппа-казеину у быков разного происхождения косвенно говорит об особенностях селекции в разных странах. Из полученных результатов видно, что отечественные быки, принадлежащие АО «Кировплем», имеют преимущественно генотип по каппа-казеину АА (17 голов, или 70,8 %), среди

импортных относительно равномерное распределение: генотип АА – у 17 быков, или 38,6 %, в т. ч. 2 из Беларуси; генотип АВ – 16 голов, или 36,4 %, в т. ч. 2 из Беларуси; генотип ВВ – 11 голов, или 25,0 %.

Полученные средние данные по основным показателям молочной продуктивности матерей и дочерей в сравнении со сверстницами по результатам геномной оценки быков с разными генотипами каппа-казеина показаны в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительная характеристика голштинских быков с разными генотипами каппа-казеина по молочной продуктивности их матерей и дочерей в сравнении со сверстницами /

Table 2 – Comparative characteristics of Holstein bulls with different kappa-casein genotypes in terms of milk productivity of their mothers and daughters in comparison with peers

Показатель / Indicator		Генотип / Genotype		
		АА	АВ	ВВ
Количество голов / Number of heads		34	21	13
Матери быков / Bull mothers	Удой, кг / Milk yield, kg	13537±247	14573±387*	14429±392
	МДЖ, % / Mass fraction of fat	4,37±0,06	4,39±0,06	4,23±0,08
	МДБ, % / Mass fraction of protein	3,34±0,02	3,47±0,04**	3,43±0,05
	Молочный жир + молочный белок, кг / Milk fat + milk protein, kg	1046±22	1143±30*	1103±34
Дочери быков ± к сверстницам / Daughters of bulls ± to their peers	Разница по удою, кг / Difference in milk yield, kg	+597±81	+720±99	+570±53
	Разница по МДЖ, % / Difference in mass fraction of fat, %	+0,10±0,02	+0,21±0,04*	+0,12±0,04
	Разница по МДБ, % / Difference in mass fraction of protein, %	+0,05±0,01	+0,12±0,02**	+0,11±0,02**

Примечания: МДЖ – массовая доля жира; МДБ – массовая доля белка; *достоверно при $P>0,95$ относительно генотипа АА, ** достоверно при $P>0,99$ относительно генотипа АА /

Notes: MFA – mass fraction of fat; MBP – mass fraction of protein; *reliable at $P>0.95$ relative to the AA genotype, **reliable at $P>0.99$ relative to the AA genotype

Как видно из данных таблицы 2, более высокий удой (14573 кг) у матерей быков с генотипом по каппа-казеину АВ, несколько меньше у матерей быков с генотипом ВВ (14429 кг). Матери быков с генотипом по каппа-казеину АА менее продуктивны (13537 кг), они уступали другим группам на 6,6–7,7 %. Животные с генотипом АВ превосходили аналогов с генотипами АА на 1036 кг (достоверно при $P>0,95$) и с генотипом ВВ – на 144 кг (недостоверно); с генотипом ВВ по сравнению с генотипом – АА на 892 кг (недостоверно).

Относительно качественных показателей молока наибольшую жирность и белковость имели матери быков с генотипом АВ соответственно 4,39 и 3,47 %, что позволило получить от них и наибольшую сумму молочного жира и молочного белка (1143 кг). В сравнении с генотипом АА это превосходство статис-

тически достоверно при $P>0,95$. Меньшее содержание массовой доли жира наблюдали у матерей быков с генотипом ВВ – 4,23 %, разница с другими группами также недостоверна. Наименьший показатель массовой доли белка у матерей быков с генотипом АА – 3,34 %, различия с генотипом АВ составили 0,13 %, что статистически достоверно при $P>0,99$.

Дочери быков с генотипом АВ при сравнении со сверстницами дали более высокую прибавку в удоях +720 кг. Тогда как у быков с генотипом АА и ВВ эти показатели ниже (597 и 570 кг). Также следует отметить, что дочери быков с генотипом АВ имеют достоверно более высокое содержание жира на 0,11% при $P>0,95$ и белка на 0,07% при $P>0,99$ в молоке по сравнению с дочерьми быков, имеющих генотип по каппа-казеину АА, от которых по этим показателям получена наименьшая прибавка.

Наши данные согласуются с исследованиями А. Э. Будько и А. Г. Коцаева, которые получили более высокие средние значения молочной продуктивности у первотелок с генотипами АВ и ВВ [12]. Такая же тенденция просматривается у Е. В. Егорашиной и Р. В. Тамаровой – наилучшие показатели продуктивности у животных с генотипом АВ [13]. Н. А. Худякова и другие определили, что наивысшие показатели молочности у коров с менее распространенным генотипом ВВ [14]. В исследованиях других ученых по изучению сыродельных свойств молока выявлено, что высокие показатели присущи животным с генотипами АВ и ВВ. Они превосходили сверстников с генотипом АА по выходу плотного казеинового сгустка и имели наименьшую продолжительность свертывания молока [9].

Однако данные при оценке быков-производителей относительно определения взаимо-

связей полиморфных молочных белков с количественными и качественными показателями молочной продуктивности несколько противоречивы. Так, А. А. Вельматов и др. установили положительную связь генотипа АА с молочной продуктивностью коров красно-пестрой породы, их превосходство было достоверным [15]. В исследованиях Т. М. Ахметова и С. В. Тюлькина более молочными были коровы, имеющие в своем генотипе аллельный вариант В [10].

При анализе генетических данных быков, принадлежащих АО «Кировплем», по бета-казеину (табл. 3) было установлено, что преобладали быки, имеющие генотип А1А2 – 35 голов, или 51,5 %. Значительно меньше производителей с генотипом А1А1 и А2А2 соответственно 19 голов, или 27,9 % и 14 голов, или 20,6 %. В целом данное распределение типичное для российских регионов и согласуется с результатами других отечественных ученых [16, 17].

Таблица 3 – Распределение быков голштинской породы в зависимости от их генотипа по бета-казеину и происхождения/
Table 3 – Distribution of Holstein bulls depending on their beta-casein genotype and origin

Показатель / Indicator	Генотип / Genotype		
	A1A1	A1A2	A2A2
Количество голов / Number of heads	19	35	14
Удельный вес, % / Specific weight, %	27,9	51,5	20,6
Быки отечественного происхождения, гол. / Bulls of domestic origin, heads	8	13	3
Быки импортного происхождения, гол. / Bulls of imported origin, heads	11	22	11

Среди быков с генотипом А1А1 отечественных – 8 голов, или 42,1 %, импортных – 11 голов, или 57,9 %, из них 3 быка из Беларуси. Достаточно много импортных быков, имеющих генотип А1А2 – 22 головы, или 62,9 %, из них 1 бык из Беларуси, отечественных всего 13 голов, или 37,1 %. Генотип А2А2 чаще встречается у быков импортного происхождения (11 голов, или 78,6 %). Среди носителей генотипа А2А2 отечественных всего 3 быка, или 21,4 %, что косвенно говорит о распространенности данных генотипов в разных странах. Из полученных данных видно, что на предприятии АО «Кировплем» среди отечественных быков преимущественно преобладают генотипы А1А2 и А1А1 – соответственно 54,2 и 33,3 %. Среди импортных быков также наибольший удельный вес имеют животные с генотипом А1А2 – 50 %, с генотипом А1А1 и А2А2 – по 25 %.

Аналогично проанализировали продуктивность матерей и дочерей в сравнении со сверстницами у быков, имеющих разные генотипы по бета-казеину (табл. 4).

Самые высокие показатели по удою имели матери быков с генотипом по бета-казеину А2А2 – 14482 кг, они превосходили другие группы на 502–665 кг, или 3,5–4,6 %, но эта разница статистически недостоверна. Наибольшая массовая доля жира в молоке – 4,49 % у матерей быков с генотипом по бета-казеину А1А2. Их превосходство составляет 0,27–0,33 %, что существенно выше других групп и статистически достоверно при $P > 0,999$. Более высокой массовой долей белка (3,43 и 3,41 %) характеризуются матери быков с генотипом А1А1 и А1А2, которые статистически достоверно превосходят матерей быков с генотипом А2А2 на 0,11–0,13 %.

При сравнении дочерей со сверстницами было установлено, что наибольшую прибавку

по удою имели дочери от быков с генотипом A2A2 – 745 кг. Они достоверно превосходили дочерей быков с генотипом A1A1. Более высоким содержанием жира в молоке отличались

дочери быков с генотипом A1A2, разница со сверстницами составила +0,17 %, а по белку лучшими были дочери быков с генотипом A2A2, их показатель был выше +0,11 %.

Таблица 4 – Сравнительная характеристика голштинских быков с разными генотипами бета-казеина по молочной продуктивности матерей и дочерей в сравнении со сверстниками /

Table 4 – Comparative characteristics of Holstein bulls with different beta-casein genotypes for milk productivity of mothers and daughters in comparison with peers

Показатель / Indicator		Генотип / Genotype		
		A1A1	A1A2	A2A2
Количество голов / Number of heads		19	35	14
Матери быков / Bull mothers	Удой, кг / Milk yield, kg	13817±449	13980±229	14482±374
	МДЖ, % / Mass fraction of fat	4,22±0,05	4,49±0,06*	4,16±0,08
	МДБ, % / Mass fraction of protein	3,43±0,04**	3,41±0,02**	3,30±0,03
	Молочный жир + молочный белок, кг / Milk fat + milk protein, kg	1060±41	1105±21	1077±20
Дочери быков ± к сверстникам / Daughters of bulls ± to their peers	Разница по удою, кг / Difference in milk yield, kg	+383±66	+717±82***	+745±93***
	Разница по МДЖ, % / Difference in mass fraction of fat, %	+0,09±0,03	+0,17±0,02	+0,14±0,06
	Разница по МДБ, % / Difference in mass fraction of protein, %	+0,06±0,02	+0,09±0,01	+0,11±0,02

Примечания: МДЖ – массовая доля жира; МБЖ – массовая доля белка; * достоверно при P>0,99 относительно генотипов A1A1 и A2A2, ** достоверно при P>0,99 относительно генотипа A2A2, *** достоверно при P>0,99 относительно генотипа A1A1 /

Notes: MFA – mass fraction of fat; MBP – mass fraction of protein; * reliable at P>0.99 relative to genotypes A1A1 and A2A2, ** reliable at P>0.99 relative to genotype A2A2, *** reliable at P>0.99 relative to genotype A1A1.

Наши результаты согласуются с данными М. А. Парамоновой, которая выявила положительное влияние аллеля A2 на величину удоя и качество молока [16]. В исследованиях С. О. Снигирев и другие установили, что коровы с бета-казеином A2A2 за 305 дней лактации имели более высокий удой [17].

Закключение. В целом в исследованиях, проведенных в Кировской области, выявлено, что на предприятии АО «Кировплем» у быков-производителей голштинской породы крупного рогатого скота преобладает генотип каппа-казеина AA, его имеют 34 быка (или 50,0 %), генотип AB встречается у 21 быка (или 30,9 %), генотип BB – у 13 голов (или 19,1 %). При анализе встречаемости генотипов по бета-казеину было установлено, что преобладали быки, имеющие генотип A1A2 – всего 35 голов, или 51,5 %. Значительно меньше производителей с генотипом A1A1 и A2A2 соответственно 19 голов, или 27,9 % и 14 голов, или 20,6 %.

У быков голштинской породы с генотипом по каппа-казеину AB установлены достоверно более высокие показатели у матерей по удою (14573 кг) и содержанию белка в молоке (3,47 %) и у дочерей по содержанию жира и белка в молоке в сравнении со сверстницами (+0,21 %, +0,12 %). Достоверно большее содержание жира в молоке (4,49%) имели матери быков с генотипом по бета-казеину A1A2. Дочери быков с генотипами A2A2 и A1A2 были достоверно продуктивнее по удою, их превосходство составило соответственно +745 кг и +717 кг. Для повышения молочной продуктивности и улучшения качества молока в среднем по стаду следует увеличивать количество животных, полученных от быков с генотипами по каппа-казеину AB и бета-казеину A1A2 и A2A2, их следует считать приоритетными при отборе и подборе.

Список литературы

1. Усманова Е. Н. Оценка и отбор коров по технологическим признакам. Современные научные тенденции в животноводстве, охотоведении и экологии: сб. ст. Международ. научн.-практ. конф. Киров: Вятская ГСХА, 2013. С. 193-194.
2. Kuzyakina L., Usmanova E., Ostapchuk P. The relationship between the live weight of first calving and indicators of reproduction ability of cows with a milk yield of at least 9000 kg per lactation. XV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2022": Collection of materials of the 15th International Scientific Conference. Global Precision Ag Innovation 2022. Rostov-on-Don, 2023. Vol. 575. pp. 1821–1830. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2_202

3. Кошаев А. Г., Гырнец Е. А. Частота встречаемости генотипов гена бета-казеина в популяции черно-пестрой голштинизированной породы крупного рогатого скота. Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2021;(93):310–314. DOI: <https://doi.org/10.21515/1999-1703-93-310-314> EDN: IZVXYG
4. Кремешков А. Ю., Горелик О. В. Голштинская порода крупного рогатого скота и ее значение в мировом скотоводстве. Молодежь и наука. 2020;(9):25. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45662632> EDN: VUJKEB
5. Кузякина Л. И., Фроликова К. Н., Мокерова Е. В. Характеристика быков-производителей голштинской породы с разным бета-казеином в АО "Кировплем". Зоотехническая наука в условиях современных вызовов: сб. тр. IV научн.-практ. конф. с международ. участием. Киров: Вятский ГАТУ, 2022. С. 80–83. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50040628> EDN: TIXWDV
6. Ивановский А. А., Пилип Л. В., Малых О. Г. Исследование ферментативной активности пробиотика Руменофит. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2004;(5):103–104.
7. Pashtetsky V., Ostapchuk P., Kuevda T., Zubochenko D., Yemelianov S., Uppe V. Use of phytobiotics in animal husbandry and poultry. E3S Web of Conferences. International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology, BFT 2020. Saint-Petersburg, 2020. Vol. 215. No. 02002. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021502002>
8. Щукина И. В., Шуклин С. Ю., Кошаев А. Г. Генетическое разнообразие быков-отцов, формирующих генофонд высокопродуктивного поголовья. Труды Кубанского государственного аграрного университета. 2020;(82):171–178. DOI: <https://doi.org/10.21515/1999-1703-82-171-178> EDN: RVRTGA
9. Tuzov I. N., Ryadchikov V. G., Ratoshniy A. N., Kulikova N. I., Koshchaev A. G. Using holstein cattle in conditions of the Krasnodar territory. Journal of Pharmaceutical Sciences and Research. 2018;10(12):3160–3163.
10. Ахметов Т. М., Тюлькин С. В. Экономическая эффективность использования коров с разными генотипами каппа-казеина. Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н. Э. Баумана. 2013;216:35–40. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20479869> EDN: RGEEQR
11. Gustavsson F., Buitenhuis A. J., Johansson M., Bertelsen H. P., Glantz M., Poulsen N. A., et al. Effects of breed and casein genetic variants on protein profile in milk from Swedish Red, Danish Holstein, and Danish Jersey cows. The Journal of Dairy Science. 2014;97(6):3866–3877. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7312>
12. Будько А. Э., Кошаев А. Г. Влияние аллелей каппа-казеина CSN3 на формирование молочной продуктивности первотелок голштинской породы. Современные проблемы в животноводстве: состояние, решения, перспективы: сб. ст. по мат-лам II Международ. научн.-практ. конф., посвящ. 90-летию акад. В. Г. Рядчикова. Краснодар: Кубанский ГАУ им. И. Т. Трубилина, 2024. С. 325–331. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=wmlnqo> EDN: WMLNQO
13. Егорашина Е. В., Тамарова Р. В. Оценка по молочной продуктивности коров разных пород с использованием генетических маркеров. Вестник АПК Верхневолжья. 2017;(1(37)):52–58. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29232076> EDN: YPRVED
14. Худякова Н. В., Кожевникова И. С., Щипакова Е. Н., Кондакова А. А., Калмыкова М. С. Частота встречаемости генотипов к-казеина и их влияние на молочную продуктивность коров холмогорской породы. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2024;25(1):75–81. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.75-81> EDN: CNPADL
15. Вельматов А. А., Трофимов В. А., Тельнов Н. О., Вельматов А. П. Изучение полиморфизма генов бета-лактоглобулина и каппа-казеина у коров красно-пестрой породы. Главный зоотехник. 2016;(1):23–27.
16. Парамонова М. А. Влияние полиморфизма гена молочного белка CSN2 на продуктивные качества скота чёрно-пестрой породы. Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2023;(5(103)):300–305. DOI: <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-103-5-300-305> EDN: UWBTHV
17. Снитирев С. О., Ламонов С. А., Скоркина И. А., Гладырь Е. А. Молочная продуктивность коров-первотелок разных породных групп чёрно-пестрого скота в зависимости от полиморфизма гена бета-казеина. Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2023;(1(72)):86–89. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50420999> EDN: WDAMNU

References

1. Usmanova E. N. Evaluation and selection of cows based on technological characteristics. Modern scientific trends in animal husbandry, hunting and ecology: collection of articles of International scientific and practical conference. Kirov: Vyatskaya GSKhA, 2013. pp. 193–194.
2. Kuzyakina L., Usmanova E., Ostapchuk P. The relationship between the live weight of first calving and indicators of reproduction ability of cows with a milk yield of at least 9000 kg per lactation. XV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2022": Collection of materials of the 15th International Scientific Conference. Global Precision Ag Innovation 2022. Rostov-on-Don, 2023. Vol. 575. pp. 1821–1830. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2_202
3. Koshchaev A. G., Gyrnets E. A. Occurrence of beta-casein genotypes in the population of black-and-white holstein dairy cattle. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021;(93):310–314. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21515/1999-1703-93-310-314>
4. Kremeshkov A. Yu., Gorelik O. V. Holstein cattle breed and its significance in world cattle breeding. *Molodezh' i nauka* = Youth and science. 2020;(9):25. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45662632>
5. Kuzyakina L. I., Frolikova K. N., Mokerova E. V. Characteristics of Holstein bulls with different beta-casein in Kirovplem JSC. Zootechnical science in the context of modern challenges: collection of articles of the IV scientific-practical conference with international participation. Kirov: Vyatskiy GATU, 2022. pp. 80–83. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50040628>
6. Ivanovskiy A. A., Pilip L. V., Malykh O. G. Investigation of the enzymatic activity of the probiotic Rumenofit. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2004;(5):103–104. (In Russ.).

7. Pashtetsky V., Ostapchuk P., Kuevda T., Zubochenko D., Yemelianov S., Uppe V. Use of phytobiotics in animal husbandry and poultry. E3S Web of Conferences. International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology, BFT 2020. Saint-Petersburg, 2020. Vol. 215. No. 02002. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021502002>
8. Shchukina I. V., Shuklin S. Yu., Koshchaev A. G. Genetic diversity of bulls-father forming a highly productive stock genous fund. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020;(82):171–178. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21515/1999-1703-82-171-178>
9. Tuzov I. N., Ryadchikov V. G., Ratoshniy A. N., Kulikova N. I., Koshchaev A. G. Using holstein cattle in conditions of the Krasnodar territory. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*. 2018;10(12):3160–3163.
10. Akhmetov T. M., Tjulkin S. V. Economic efficiency use of cows with different genotypes of kappa-casein. *Uchenye zapiski Kazanskoy gosudarstvennoy akademii veterinarnoy meditsiny im. N. E. Baumana* = Scientific Notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine. 2013;216:35–40. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20479869>
11. Gustavsson F., Buitenhuis A. J., Johansson M., Bertelsen H. P., Glantz M., Poulsen N. A., et al. Effects of breed and casein genetic variants on protein profile in milk from Swedish Red, Danish Holstein, and Danish Jersey cows. *The Journal of Dairy Science*. 2014;97(6):3866–3877. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2013-7312>
12. Budko A. E., Koshchaev A. G. Realisation of genetic potential of dairy productivity of holstein first-calf heifers with different genotypes for the kappa-casein gene locus CSN3. *Modern problems in animal husbandry: status, solutions, prospects: collection of articles on the materials of the II International scientific and practical conference dedicated to the 90th anniversary of Academician V. G. Ryadchikov*. Krasnodar: *Kubanskiy GAU im. I. T. Trubilina*, 2024. pp. 325–331. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=wmlnqo>
13. Egorashina E. V., Tamarova R. V. Evaluation of different cow breeds on milk productivity with the use of genetic markers. *Vestnik APK Verkhnevolzh'ya* = Bulletin of the AIC of the Upper Volga. 2017;(1(37)):52–58. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29232076>
14. Khudyakova N. V., Kozhevnikova I. S., Shchipakova E. N., Kondakova A. A., Kalmykova M. S. Frequency of occurrence of k-casein genotypes and their effect on the milk productivity of kholmogory cows. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(1):75–81. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.1.75-81>
15. Velmatov A. A., Trofimov V. A., Telnov N. O., Velmatov A. P. The study of polymorphism of beta-lactoglobulin and kappa-casein genes in cows of red-and-white breed. *Glavnyy zootekhnik* = Head of Animal Breeding. 2016;(1):23–27. (In Russ.).
16. Paramonova M. A. Influence of polymorphism of the milk protein csn2 gene on the productive qualities of black-and-white cattle. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2023;(5(103)):300–305. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.37670/2073-0853-2023-103-5-300-305>
17. Snigirev S. O., Lamonov S. A., Skorkina I. A., Gladyr E. A. Milk productivity of cows of different genotypic groups of black-and-white cattle depending on the polymorphism of the beta-casein gene. *Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2023;(1(72)):86–89. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50420999>

Сведения об авторах

✉ Кузякина Людмила Ивановна, кандидат с.-х. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Вятский государственный агротехнологический университет», Октябрьский проспект, 133, г. Киров, Российская Федерация, 610017, e-mail: info@vgatu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1503-484X>, e-mail: klikirov43@mail.ru

Усманова Елена Николаевна, кандидат с.-х. наук, доцент, старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Вятский государственный агротехнологический университет», Октябрьский проспект, 133, г. Киров, Российская Федерация, 610017, e-mail: info@vgatu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0744-4603>

Смирнов Егор Алексеевич, студент 3-го курса, ФГБОУ ВО «Вятский государственный агротехнологический университет», Октябрьский проспект, 133, г. Киров, Российская Федерация, 610017, e-mail: info@vgatu.ru

Мокерова Елена Владимировна, начальник отдела по племенной работе, АО «Кировское» по племенной работе», ул. Земская, д. 38, п. Захарищевы, г. Киров, Кировская обл., 610051, e-mail: kirovplem@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0149-7214>

Information about the authors

✉ Ludmila I. Kuzyakina, PhD in Agricultural Science, associate professor, Vyatka State Agrotechnological University, Oktyabrsky Prospekt, 133, Kirov, Russian Federation, 610017, e-mail: info@vgatu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1503-484X>, e-mail: klikirov43@mail.ru

Elena N. Usmanova, PhD in Agricultural Science, associate professor, senior researcher, Vyatka State Agrotechnological University, Oktyabrsky Prospekt, 133, Kirov, Russian Federation, 610017, e-mail: info@vgatu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0744-4603>

Egor A. Smirnov, 3rd year student, Vyatka State Agrotechnological University, Oktyabrsky Prospekt, 133, Kirov, Russian Federation, 610017, e-mail: info@vgatu.ru

Elena V. Mokerova, Head of the Department for Breeding Farm Animals, Kirov Joint Stock Company for breeding work, Zemskaya str., 38, Zakhariushchevy village, Kirov, Kirov region, Russian Federation, 610051, e-mail: kirovplem@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0149-7214>

✉ – Для контактов / Corresponding author

Динамика живой массы коров холмогорской породы по полиморфизму гена лептина

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

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

Для улучшения эффективности молочного производства необходимо уделять внимание качеству выращивания молодняка крупного рогатого скота, рост и развитие которого зависит не только от паратипических, но и от генетических факторов. Исследовательская цель работы заключалась в выявлении связи между генотипом лептина (сайт A80V) и изменениями показателей живой массы коров холмогорской породы в разные возрастные периоды. Изучаемое поголовье включало 330 коров холмогорской породы из Архангельской области. Биоматериалом служила цельная кровь. Визуализацию результатов осуществляли с помощью электрофореза в 2%-ном агарозном геле с маркером молекулярного веса Step50 (ООО «Биолабмикс», Россия). Результаты исследования показали преобладание носителей аллеля А, следовательно генотип АА был наиболее распространенным. Животные с генотипом АВ имели самый высокий прирост живой массы за 6, 10, 12 и 18 месяцев. Возраст первого осеменения, первого отела и первого плодотворного осеменения не различался значимо. Однако обнаружены достоверные различия в живой массе при первом осеменении между группами с генотипами АВ и VV (+16,94 кг), а также между животными с генотипами АА и VV (+15,49 кг). Средний прирост живой массы в месяц также был выше у животных с генотипом АВ (+18,03±0,31 кг). Считаем, что наиболее предпочтительным генотипом гена лептина сайта A80V в выборке коров холмогорской породы является генотип АВ. Дальнейшее изучение гена лептина и его влияния поможет получить более полное представление о его роли в формировании роста живой массы у животных.

Ключевые слова: лептин, сайт A80V, крупный рогатый скот, живая масса, воспроизводительная способность

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук (FUUW-2024-0006).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Худякова Н. А., Кожевникова И. С., Ступина А. О., Классен И. А., Кашин А. С. Динамика развития живой массы коров холмогорской породы с разными генотипами гена лептина. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(1):158–165. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.158-165>

Поступила: 24.05.2024

Принята к публикации: 15.01.2025

Опубликована онлайн: 26.02.2025

Dynamics of the development of live weight in cows of the Kholmogory breed according to the polymorphism of the leptin gene

© 2025. Natalya A. Khudyakova✉, Irina S. Kozhevnikova, Aleksandra O. Stupina, Inga A. Klassen, Andrej S. Kashin

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

To improve the efficiency of dairy production, it is necessary to pay attention to the quality of rearing young cattle the growth and development of which depend not only on paratypical, but also on genetic factors. The research goal of the work was to identify the relationship between the leptin gene type (site A80V) and changes in live weight indicators in cows of the Kholmogory breed at different age periods. The studied livestock included 330 cows of the Kholmogory breed from the Arkhangelsk region. The whole blood was used as biomaterial. The results were visualized by electrophoresis in 2 % agarose gel with a molecular weight marker Step50 (Biolabmix LLC, Russia). The results of the study showed the predominance of carriers of the A allele, therefore, the AA genotype was the most common. Animals with the AV genotype had the highest weight gain over 6, 10, 12 and 18 months. The age of the first insemination, the first calving and the first fruitful insemination did not differ significantly. However, significant differences in live weight were found at the first insemination between groups with AV and VV genotypes (+16.94 kg), as well as between animals with AA and VV genotypes (+15.49 kg). The average weight gain per month was also higher in animals with the AV genotype (+18.03±0.31 kg). It has been established that the most preferred genotype of the leptin gene of the A80V site in the sample of cows of the Kholmogorsky breed is the AV genotype. The further study of the leptin gene and its effects will help to gain a more complete understanding of its role in shaping the growth of living tissue in animals.

Keywords: leptin, A80V site, cattle, live weight, reproductive ability

Acknowledgments: the research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (FUUW-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: Khudyakova N. A., Kozhevnikova I. S., Stupina A. O., Klassen I. A., Kashin A. S. Dynamics of the development of live weight in cows of the Kholmogory breed according to the polymorphism of the leptin gene. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):158–165. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.158-165>

Received: 24.05.2024

Accepted for publication: 15.01.2025

Published online: 26.02.2025

Высокая молочная продуктивность коров зависит от динамики их развития и прироста в период выращивания. Данные характеристики развития определяют время начала охоты и возможность проведения первого осеменения. Следовательно, успех в молочном животноводстве напрямую зависит от того, насколько эффективно организован процесс выращивания и кормления молодняка [1].

Для возраста первого осеменения животное должно достигнуть определенной живой массы. Очевидно, чем раньше произойдет осеменение, тем быстрее появится теленок, и тем меньше будет затрат на «непродуктивную» корову [2].

Для повышения рентабельности молочного производства необходимо уделять внимание качеству выращивания ремонтного молодняка крупного рогатого скота, на рост и развитие которого оказывают влияние не только паратипические, но и генетические факторы, одним из которых может являться ген лептина [3].

Лептин (LEP) – гормон жировой ткани, принимающий участие в регуляции питания, а также в контроле живой массы животного и расхода энергии. Ген лептина представляет собой перспективный маркерный ген, влияющий на функциональное долголетие животных. Плейотропный эффект действия лептина предполагает его комплексное воздействие на различные физиологические процессы в организме животного [4]. Так, например, А. Д. Лемякин с соавт. в своем исследовании выявили тенденции к наличию более высоких воспроизводительных качеств у коров костромской, черно-пестрой и ярославской пород носительниц аллелей А гена лептина [5]. По данным О. С. Зайцевой с соавт., гетерозиготные коровы голштинской породы по гену LEP были наиболее предрасположены к кетозу [6]. В статье Н. В. Ковалюк с соавт. указывается, что полиморфизм гена лептина (LEP) демонстрирует ассоциации с содержанием жира и

белка в молоке, а также с такими физиологическими параметрами, как легкость отелов и продолжительность гестации. Также в работе выдвигается предположение о том, что полиморфные варианты R25C и Y7F, расположенные во втором экзоне, а также A80V, находящийся в третьем экзоне, могут быть связаны с продуктивным долголетием животных [7]. Кроме того, исследование Н. В. Ковалюк и Е. А. Гырнец показало, что дочери быков производителей с генотипом AV негативно влияют на молочную продуктивность [3].

Аминокислотная последовательность белка лептина включает 167 аминокислотных остатков и 21 аминокислотную сигнальную последовательность. У крупного рогатого скота ген лептина размещен на 4-й хромосоме (BTA 4) и состоит из трех экзонов, однако только два из них отвечают за кодирование структуры белка лептина. Кодировочная область гена лептина включает в себя второй и третий экзоны, разделенные интроном длиной около 2 кб. Размер области промотора составляет примерно 3 кб [8, 9]. Описано около 60 SNP полиморфизмов гена лептина, которые располагаются в экзонах и интронах гена, а также в его промоторной области [10]. Наиболее изучены к настоящему времени и представляют интерес полиморфизмы A80V, Y7F и R25C.

В исследовании Д. Б. Косян и Е. А. Русаковой авторы обнаружили, что гетерозиготный генотип по гену лептина сайта A80V герефордской породы коров имеет лучшие характеристики по показателям живой массы, начиная с 8-го месяца. Также наиболее высокий среднесуточный прирост выявлен у животных с генотипом AV [11]. Тогда как в работе М. П. Дубровской и Н. П. Герасимова коровы герефордской породы с генотипом AA сайта A80V гена лептина имели большую живую массу в сравнении с другими генотипами. Также авторы в своем исследовании рассматривали ген соматотропина (GH) и обнаружили,

что влияние лептина на живую массу и конституцию было выше, чем у GH [12].

Цель исследования – выявление ассоциаций гена лептина (сайт A80V) с динамикой развития живой массы коров холмогорской породы.

Исходя из цели исследования были поставлены следующие **задачи**:

- изучить полиморфизм гена лептина;
- провести статистический анализ полученных данных;
- соотнести полученные данные генотипирования с живой массой крупного рогатого скота холмогорской породы;
- проанализировать полученные результаты.

Научная новизна – ген лептин (сайт A80V) представляет собой исследовательский и научный интерес, так как практически не изучен у коров холмогорской породы, поэтому впервые проведено генотипирование значительной части животных в сельскохозяйственном предприятии в условиях Арктической зоны Российской Федерации.

Материал и методы. Объектом исследования служило маточное поголовье крупного рогатого скота холмогорской породы, содержащееся в АО «Холмогорский Племязавод». Количество исследуемых животных – 330 голов. Отбор крови осуществляли ветеринарными врачами в специальные вакуумные пробирки с КЗ ЭДТА. Экстракцию ДНК проводили с помощью набора реагентов «МагноПрайм ВЕТ» в соответствии с приложенным протоколом.

Полиморфизм гена лептина определяли методом ПЦР-ПДРФ. Реакционная смесь для проведения амплификации на основе набора ПЦР с HS-Taq (+MgCl₂) (ООО «Биолабмикс», Россия) характеризовалась следующим конечным составом: 10 мМ Трис-НСl (рН 8,5); 50 мМ KCl; 1,5 мМ MgCl₂; 0,1 % (о/о) Tween 20; по 0,4 мкМ прямого (5'-CAAGCAGGAAA-TAGGGAGTCATGG-3') и обратного (5'-CTGGTGAGGATCTGTTGGTAGGTC-3') праймеров; по 0,2 мМ каждого dNTP; 2,5 е.а. HS-Taq DNA-полимеразы; 200 нг ДНК.

В таблице 1 представлен протокол температурных режимов циклов ПЦР.

Таблица 1 – Процедура амплификации с горячим стартом /
Table 1 – Hot-start amplification procedure

Стадия / Stage	Температура, °C / Temperature, °C	Время инкубации / Incubation time	Количество циклов / Number of cycles
Предварительная денатурация / Pre-denaturation	95	3 мин / 3 minutes	1
Денатурация / Denaturation	95	30 с / 30 seconds	32
Отжиг / Annealing	67	30 с / 30 seconds	
Элонгация / Elongation	72	30 с / 30 seconds	
Финальная элонгация / Final elongation	72	7 мин / 7 minutes	1

Реакционная смесь для проведения рестрикции на основе набора эндонуклеазы рестрикции PspE I (ООО «СибЭнзайм», Россия) характеризовалась следующим конечным составом: 10 мМ Трис-НСl (рН 7,6); 10 мМ MgCl₂; 1 мМ дитиотреитола; 10 е.а. эндонуклеазы рестрикции PspE I; 2000 нг ДНК – амплификата.

Смесь инкубировали при 37 °C в течение 19 часов. Для определения длин фрагментов ДНК, полученных в ходе рестрикции, было проведено электрофоретическое разделение в 2%-ном агарозном геле в течение 4 часов при 100 В (табл. 2, рис. 1).

Таблица 2 – Длина ДНК-продуктов, п.н. /
Table 2 – Length of DNA products, bp

Длина продукта амплификации / Amplification product length	Длина продуктов рестрикции / Length of restriction products		
	AA	AV	VV
424	424	398/26	424/398/26

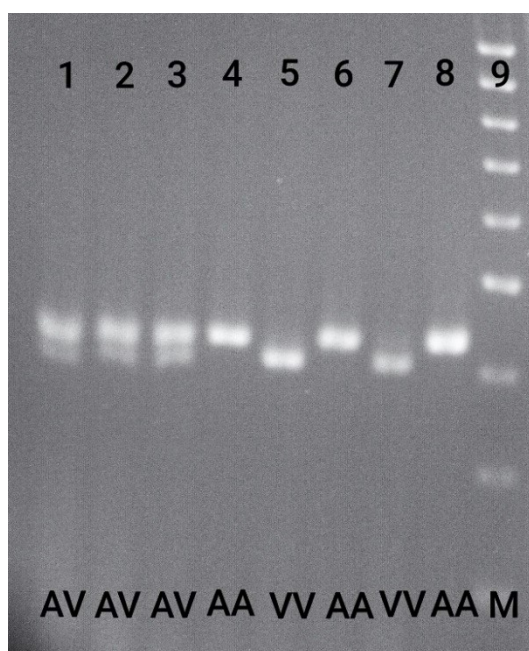


Рис. 1. Электрофореграмма рестрикции гена LEP по полиморфизму A80V, М – маркер (Step 100 DNA Ladder) /

Fig. 1. Restriction electrophoregram of LEP gene by A80V polymorphism, M – marker (Step 100 DNA Ladder)

Статистическую обработку результатов типирования проводили согласно Е. К. Меркурьевой и Г. Н. Шангиным-Березовским¹.

Результаты и их обсуждение. В результате исследования определили частоту встречаемости аллелей и генотипов гена лептина, данные представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Частота встречаемости генотипов гена лептина (A80V), у коров холмогорской породы /
Table 3 – The frequency of occurrence of leptin gene genotypes (A80V) in cows of the Kholmogory breed

Кол-во голов, n / Livestock, n	Тип распределения / Type of distribution	AA		AV		VV		Частота аллелей, % / Frequency of alleles, %		χ^2
		n	%	n	%	n	%	A	V	
330	Н	247	74,85	74	22,42	9	2,73	86	14	1,41
	О	244	74,06	79	23,99	6	1,94			

Примечания: Н – наблюдаемое распределение генотипов, О – ожидаемое распределение генотипов /
Notes: H is the observed distribution of genotypes, O is the expected distribution of genotypes

В исследуемой выборке наиболее часто встречаются особи с аллелем А (86 %), животные, имеющие аллель V в генотипе занимали 14 % от всего поголовья. Из 330 коров 247 имели генотип AA, что составило 74,85 %. Данный генотип преобладает в выборке. Генотип AV имеет частоту встречаемости 22,42 %, а генотип VV всего 2,73 %. Генетическое равновесие по закону Харди-Вайнберга сохранено, наблюдаемая частота генотипов соответствует ожидаемой.

Значительное преобладание аллеля А гена лептина в стаде зафиксировали также Н. В. Ковалюк с соавт., они получили следу-

ющие результаты – частота встречаемости аллеля А у коров, находящихся на 1–3-й лактациях, составила 0,98, у коров на 5–9-й лактациях – 0,97. Авторы отметили, что в обеих выборках животных отсутствует генотип VV, а частота встречаемости генотипа AV составила 0,06 и 0,04 соответственно [13].

В процессе исследования животных, входящих в изучаемую выборку, была проведена статистическая обработка и установлена связь показателей живой массы в разные возрастные периоды жизни с различными генотипами гена лептина (сайта A80V). Результаты представлены в таблице 4.

¹Меркурьева Е. К., Шангин-Березовский Г. Н. Генетика с основами биометрии. Серия: Учебники и учебные пособия для высших с.-х. учебных заведений. М.: Колос, 1983. 400 с.

URL: https://archive.org/details/1983_20211212

Таблица 4 – Динамика развития живой массы коров холмогорской породы с разными генотипами гена лептина (сайта A80V) /

Table 4 – Dynamics of the development of live weight in cows of the Kholmogory breed with different genotypes of the leptin gene (site A 80 M)

Показатель / Indicator	Генотип / Genotype			
	AA	AV	VV	всего / total
Количество голов, n / Livestock, n	247	74	9	330
Живая масса, кг / Live weight, kg:				
- при рождении / at birth	38,82±0,33	38,50±0,56	40,00±2,27	38,78±0,29
- в 6 месяцев / at 6 months	148,43±1,34	149,18±2,17	144,22±6,25	148,48±1,13
- в 10 месяцев / at 10 months	218,75±1,96	222,08±3,22	214,67±10,63	219,39±1,66
- в 12 месяцев / at 12 months	252,87±2,22	257,35±3,94	247,56±14,67	253,73±1,93
- в 18 месяцев / at 18 months	355,12±2,87	361,99±5,49*	338,11±12,45*	356,20±2,51

* Достоверные различия между группами при $P \leq 0,05$ /

* Significant differences between the groups at $P \leq 0.05$

Наибольший средний показатель по живой массе при рождении отмечен у животных с генотипом VV. У коров с генотипами AA и AV различия живой массы при рождении не обнаружены. Животные в возрасте 6, 10, 12 и 18 месяцев с генотипом AV обладают наибольшими средними показателями по живой массе в сравнении с носителями других гено-

типов. Достоверная разница по показателю живой массы выявлена между группами коров с генотипом AV и VV в 18 месяцев и составила 23,88 кг.

В изучаемой выборке животных рассчитаны средние показатели воспроизводительной способности коров с разными генотипами гена лептина (табл. 5).

Таблица 5 – Средние показатели воспроизводительной способности коров холмогорской породы с разными генотипами гена лептина /

Table 5 – Average indicators of reproductive ability of Kholmogory cows with different genotypes of the leptin gene

Показатель / Indicator	Генотип / Genotype			
	AA	AV	VV	Всего
Количество голов, n / Livestock, n	247	74	9	330
Возраст первого осеменения, мес. / Age of first insemination, months	18,53±0,13	18,27±0,21	18,67±0,61	18,47±0,11
Живая масса при первом осеменении, кг / Live weight at the first insemination, kg	362,16±0,58*	363,61±1,09*	346,67±2,56*	362,06±0,51
Возраст первого отела, мес. / Age of the first calving, month	28,23±0,15	28,08±0,25	28,33±0,52	28,20±0,12
Возраст 1 плодотворного осеменения, мес. / Age of the first fruitful insemination, months	19±0,15	19±0,25	20±0,50	19±0,12

* Достоверные различия между группами при $P \leq 0,05$ /

* Significant differences between the groups at $P \leq 0.05$

Достоверная разница живой массы при первом осеменении коров в исследуемой выборке отмечена у особей с гетерозиготным генотипом AV по гену лептина – у 74 голов средняя живая масса составила 363,61 кг. Также достоверная разница определена у 247 коров с генотипом AA и у 9 голов с генотипом VV – 362,16 и 346,67 кг соответственно.

Таким образом, животные с генотипом AV характеризуются максимальной живой массой,

более ранним возрастом первого осеменения и соответственно первого отела.

Масса животных при первом оплодотворении играет ключевую роль в определении скорости и интенсивности роста молодняка, а также отражает уровень их полноценного развития и готовности к эффективной эксплуатации в будущем [14, 15]. В исследовании Л. Л. Петрухиной и С. Л. Белозерцевой изучалось влияние возраста и массы коров при первом

осеменении на величину удоев и их пожизненную продуктивность. В результате авторы сделали следующие выводы: коровы, достигшие возраста 15-16 месяцев, характеризовались лучшими показателями пожизненной продуктивности и продуктивного долголетия; животные с живой массой 400–410 кг имели самые высокие

удои [16]. В исследовании Н. Д. Маматовой первотелки с живой массой более 530 кг отличались меньшим сроком хозяйственного использования [17].

В ходе работы рассчитали средний прирост живой массы в месяц с момента рождения до 18 месяцев (табл. 6).

Таблица 6 – Средний прирост живой массы коров холмогорской породы в месяц от рождения до 18 месяцев /
Table 6 – Average body weight gain of Kholmogory cows per month from birth to 18 months

Генотип / Genotype	Количество голов, n / Livestock, n	Среднемесячный прирост живой массы, кг / Average monthly body weight gain, kg
AA	247	17,57±0,16
AV	74	18,03±0,31*
VV	9	16,65±0,74*
Всего / Total	330	17,65±0,14

*Достоверные различия между группами при $P \leq 0,05$ /

*Significant differences between the groups at $P \leq 0.05$

Анализ данных таблицы 6 выявил, что самый высокий средний показатель прироста живой массы в месяц получен у животных с генотипом AV, самый низкий – у коров с генотипом VV. Достоверная разница обнаружена между генотипами AV и VV – 1,38 кг.

Заключение. Таким образом, результаты исследования показали, что в изученном стаде коров холмогорской породы преобладают носители аллеля А, соответственно генотип AA имеет наибольшую частоту встречаемости – 74,85 %. Преимущество по живой массе за 18 месяцев показали животные с генотипом AV

(361,99±5,49 кг). Достоверные различия обнаружены по показателю живой массы при первом осеменении между группами коров с генотипами AV и VV, а также между животными с генотипами AA и VV, аллель А положительно повлияла на изучаемые нами хозяйственно полезные признаки. Наибольший средний прирост живой массы в месяц также выявлен у коров с генотипом AV. Дальнейшее изучение гена лептина и его сайтов поможет получить более полные сведения о влиянии гена на показатели живой массы коров.

Список литературы

1. Часовщикова М. А., Козлов К. А. Продуктивное долголетие коров черно-пестрой породы в зависимости от возраста и живой массы при первом осеменении. Агропродовольственная политика России. 2021;(4):37–40. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47861957> EDN: XNCIZG
2. Wangchuk K., Wangdi J., Mindu M. Comparison and reliability of techniques to estimate live cattle body weight. Journal of Applied Animal Research. 2017;46(1):349–352 DOI: <https://doi.org/10.1080/09712119.2017.1302876>
3. Ковалюк Н. В., Гырнец Е. А. Полиморфизм аллелей гена Lер как генетический маркер функционального долголетия крупного рогатого скота айрширской породы. Universum: химия и биология. 2016;(6(24)):3. Режим доступа: <http://7universum.com/ru/nature/archive/item/3257> EDN: WAIRVB
4. Комендант Т. М., Епишко О. А., Чебуранова Е. С. Оптимизация методики выявления полиморфизмов гена лептина (LEP), влияющего на продуктивное долголетие крупного рогатого скота. Сельское хозяйство – проблемы и перспективы: сб. научн. тр. Гродно: Гродненский ГАУ, 2017. Т. 37. С. 99–105. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=yozazo> EDN: YOZAZO
5. Лемякин А. Д., Тяжченко А. Н., Сабетова К. Д., Чаицкий А. А., Щеголев П. О., Королев А. А. Воспроизводительная способность коров отечественных молочных пород с различными аллельными вариантами гена лептина. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022;23(6):884–895. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.6.884-895> EDN: HVVDOA
6. Зайцева О. С., Бытов М. В., Вольская С. В., Мартынов Н. А., Осипова Ю. А., Юсупова Ч. Р. Оценка аллельного разнообразия гена лептина и степени ассоциации его однонуклеотидных полиморфизмов с биохимическими маркерами предрасположенности к развитию кетоза у коров. Проблемы биологии продуктивных животных. 2024;(2):45–55. DOI: <https://doi.org/10.25687/1996-6733.prodanimbio.2024.2.45-55> EDN: NHMOHR
7. Ковалюк Н. В., Сацук В. Ф., Мачульская Е. В., Шахназарова Ю. Ю. Возможные причины и последствия распространения отдельных аллельных вариантов гена LEP в группах айрширского и голштинского скота. Генетика. 2018;54(12):1442–1447. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016675818120068> EDN: MFVYLB

8. Щеголев П. О., Сабетова К. Д., Чаицкий А. А., Сорокина А. Связь полиморфизма гена лептина (LEP) с хозяйственно полезными признаками крупного рогатого скота. Аграрный вестник Нечерноземья. 2021;(1(1)):25–32. DOI: https://doi.org/10.52025/2712-8679_2021_01_25 EDN: HBJLBZ
9. Гайнутдинова Э. Р., Сафина Н. Ю., Шакиров Ш. К., Варламова М. И. Влияние полиморфизма гена лептина (LEP) на молочную и мясную продуктивность коров-первотелок голштинской породы. Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н. Э. Баумана. 2021;245(1):24–28. DOI: <https://doi.org/10.31588/2413-4201-1883-245-1-24-28> EDN: ZRWONH
10. Ковалюк Н. В., Сацук В. Ф., Мачульская Е. В., Морковкина Н. А., Шахназарова Ю. Ю. Использование полиморфизма локуса LEP в селекции чернопестрого скота. Молочное и мясное скотоводство. 2017;(3):14–16. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29389861> EDN: YTDPRG
11. Косян Д. Б., Русакова Е. А. Взаимосвязь полиморфизма гена *lep/a80v* с ростовыми характеристиками крупного рогатого скота. Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. 2019;(4):26. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42503559> EDN: JDCQBZ
12. Дубовскова М. П., Герасимов Н. П. Генетическая структура и ассоциация полиморфизма генов гормона роста (L127V) и лептина (A80V) с продуктивностью в северо-кавказской популяции герефордской породы. Животноводство и кормопроизводство. 2020;103(3):91–101. DOI: <https://doi.org/10.33284/2658-3135-103-3-91> EDN: ZNLSRY
13. Ковалюк Н. В., Сацук В. Ф., Волченко А. Е., Мачульская Е. В. Полиморфизм аллелей гена LEP у субпопуляции крупного рогатого скота айрширской породы. Генетика. 2015;51(2):266–270. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0016675815020101> EDN: THNXCL
14. Майоров В. А., Козловская А. Ю., Леонтьев А. А., Афанасьев К. А. Продолжительность хозяйственного использования коров в связи с возрастом первого отела. Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. 2015;(4):8–11. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/vmhdbf> EDN: VMHDBF
15. Новотольская О. П., Козловская А. Ю., Леонтьев А. А., Скопцова Т. И., Козловский В. Ю. Показатели воспроизводительной способности айрширских коров разного происхождения. Аграрный вестник Урала. 2014;(1(119)):47–50. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21681381> EDN: SGLUMR
16. Петрухина Л. Л., Белозерцева С. Л. Влияние возраста первого осеменения и живой массы на молочную продуктивность коров. Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2020;50(2):57–63. DOI: <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2020-2-7> EDN: VWZNTD
17. Маматова Н. Д. Влияние возраста первого осеменения на продуктивное долголетие коров. Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2018;(3(161)):110–114. Режим доступа: <http://vestnik.asau.ru/index.php/vestnik/article/view/1389> EDN: YUFLJY

References

1. Chasovshchikova M. A., Kozlov K. A. Productive longevity of the black-and-white breed of cows in relation to age and live weight at the first insemination. *Agroprodnovol'stvennaya politika Rossii* = Agri-Food Policy in Russia. 2021;(4):37–40. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47861957>
2. Wangchuk K., Wangdi J., Mindu M. Comparison and reliability of techniques to estimate live cattle body weight. *Journal of Applied Animal Research*. 2017;46(1):349–352 DOI: <https://doi.org/10.1080/09712119.2017.1302876>
3. Kovalyuk N. V., Gynets E. A. Polymorphism of *lep* gene allele as a genetic marker of functional longevity of ayrshire cattle. *Universum: khimiya i biologiya*. 2016;(6(24)):3. (In Russ.). URL: <http://7universum.com/ru/nature/archive/item/3257>
4. Komendant T. M., Epishko O. A., Cheburanova E. S. Optimization of the method of detecting polymorphisms of the leptin gene (LEP), affecting the productive longevity of cattle. *Agriculture – problems and prospects: collection of scientific papers. Grodno: Grodnenskiy GAU*, 2017. Vol. 37. pp. 99–105. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=yozazo>
5. Lemyakin A. D., Tyazhchenko A. N., Sabetova K. D., Chaitskiy A. A., Shchegolev P. O., Korolev A. A. Reproductive ability of cows of domestic dairy breeds with different allelic variants of the leptin gene. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2022;23(6):884–895. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.6.884-895>
6. Zaytseva O. S., Bytov M. V., Volskaya S. V., Martynov N. A., Osipova Yu. A., Yusupova Ch. R. Assessment of allelic diversity of the leptin gene and associations of its single nucleotide polymorphisms with biochemical markers of predisposition to ketosis in cows. *Problemy biologii produktivnykh zhivotnykh* = Problems of Productive Animal Biology. 2024;(2):45–55. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25687/1996-6733.prodanimbiol.2024.2.45-55>
7. Kovalyuk N. V., Satsuk V. F., Machulskaya E. V., Shakhnazarova Yu. Yu. Possible causes and consequences of the distribution of separate allelic variants of the LEP gene in the groups of ayrshire and holstein cattle. *Genetika* = Russian Journal of Genetics. 2018;54(12):1442–1447. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016675818120068>
8. Shchegolev P. O., Sabetova K. D., Chaitskiy A. A., Sorokina A. Relationship of leptin gene polymorphism (LEP) with economically useful traits of cattle. *Agrarnyy vestnik Nечернозем'ya* = Agrarian Bulletin of the Non-Chernozem region. 2021;(1(1)):25–32. (In Russ.). DOI: https://doi.org/10.52025/2712-8679_2021_01_25
9. Gaynutdinova E. R., Safina N. Yu., Shakirov Sh. K., Varlamova M. I. Influence of leptin (LEP) gene polymorphism on dairy and meat productivity of holstein heifers. *Uchenye zapiski Kazanskoy gosudarstvennoy akademii veterinarnoy meditsiny im. N. E. Bauman* = Scientific Notes Kazan Bauman State Academy of Veterinary Medicine. 2021;245(1):24–28. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31588/2413-4201-1883-245-1-24-28>
10. Kovalyuk N. V., Satsuk V. F., Machulskaya E. V., Morkovkina N. A., Shakhnazarova Yu. Yu. Use of polymorphism at loci of LEP in breeding of black-motley cattle. *Molochnoe i myasnoe skotovodstvo* = Journal of Dairy and Beef Cattle Farming. 2017;(3):14–16. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29389861>

11. Kosyan D. B., Rusakova E. A. Relationship of *lep/a80v* gene polymorphism with growth characteristics of cattle. *Byulleten' Orenburgskogo nauchnogo tsentra UrO RAN*. 2019;(4):26. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42503559>
12. Dubovskaya M. P., Gerasimov N. P. Genetic structure and association of growth hormone (*L127V*) and leptin (*A80V*) gene polymorphism with productivity in the north caucasian population of the hereford breed. *Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo* = Animal Husbandry and Fodder Production. 2020;103(3):91–101. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.33284/2658-3135-103-3-91>
13. Kovalyuk N. V., Satsuk V. F., Volchenko A. E., Machulskaya E. V. LEP gene allelic polymorphism in a sub-population of ayrshire cattle. *Genetika* = Russian Journal of Genetics. 2015;51(2):266–270. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.7868/S0016675815020101>
14. Mayorov V. A., Kozlovskaya A. Yu., Leontev A. A., Afanasev K. A. The duration of economic use of cows due to the age of the first calving. *Izvestiya Velikolukskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2015;(4):8–11. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/vmhdbf>
15. Novotolskaya O. P., Kozlovskaya A. Yu., Leontev A. A., Skoptsova T. I., Kozlovskiy V. Yu. Reproductive ability indicators of ayrshire cows of various origin. *Agrarnyy vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals. 2014;(1(119)):47–50. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21681381>
16. Petrukhina L. L., Belozertseva S. L. Influence of the age at the first insemination and live weight on milk productivity of cows. *Sibirskiy vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki* = Siberian Herald of Agricultural Science. 2020;50(2):57–63. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2020-2-7>
17. Mamatova N. D. The influence of the first insemination age on productive life-span of cows. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Altai State Agricultural University. 2018;(3(161)):110–114. (In Russ.). URL: <http://vestnik.asau.ru/index.php/vestnik/article/view/1389>

Сведения об авторах

✉ **Худякова Наталья Александровна**, кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник, ФГБНУ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, пр. Никольский, д. 20, г. Архангельск, Российская Федерация, 163020, e-mail: dirnauka@fciaarctic.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1302-2965>, e-mail: nata070707hudyakova@yandex.ru

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, пр. Никольский, д. 20, г. Архангельск, Российская Федерация, 163020, e-mail: dirnauka@fciaarctic.ru, ORCID: <https://orcid.org/000-0001-7194-9465>

Ступина Александра Олеговна, младший научный сотрудник, ФГБНУ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, пр. Никольский, д. 20, г. Архангельск, Российская Федерация, 163020, e-mail: dirnauka@fciaarctic.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7664-3684>

Класен Инга Андреевна, младший научный сотрудник, ФГБНУ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, пр. Никольский, д. 20, г. Архангельск, Российская Федерация, 163020, e-mail: dirnauka@fciaarctic.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4421-6087>

Кашин Андрей Сергеевич, младший научный сотрудник, ФГБНУ Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н. П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, пр. Никольский, д. 20, г. Архангельск, Российская Федерация, 163020, e-mail: dirnauka@fciaarctic.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1155-0339>

Information about the authors

✉ **Natalya A. Khudyakova**, PhD in Agricultural Science, senior researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Severnaya Dvina Embankment, 23, Arkhangelsk, Russian Federation, 163000, e-mail: dirnauka@fciaarctic.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1302-2965>, e-mail: nata070707hudyakova@yandex.ru

Irina S. Kozhevnikova, PhD in Biological Science, senior researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Severnaya Dvina Embankment, 23, Arkhangelsk, Russian Federation, 163000, e-mail: dirnauka@fciaarctic.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, Severnaya Dvina Embankment, 23, Arkhangelsk, Russian Federation, 163000, e-mail: dirnauka@fciaarctic.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, Severnaya Dvina Embankment, 23, Arkhangelsk, Russian Federation, 163000, e-mail: dirnauka@fciaarctic.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4421-6087>

Andrej S. Kashin, junior researcher, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Severnaya Dvina Embankment, 23, Arkhangelsk, Russian Federation, 163000, e-mail: dirnauka@fciaarctic.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1155-0339>

✉ – Для контактов / Corresponding author



Влияние теплового стресса на репродуктивные качества свиноматок крупной белой породы

© 2025. С. Н. Гудков , Н. Н. Горб, О. А. Зайко, Л. П. Ермакова, А. Интханухак
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет»,
г. Новосибирск, Российская Федерация

Работа посвящена изучению репродуктивных качеств свиноматок, подвергшихся тепловому стрессу после осеменения, в период осеменения и до осеменения (I, II и III группы соответственно). В племенном репродукторе поддерживается постоянная температура в пределах 18,0...21,0 °С. Условия теплового стресса (22,08±4,28...25,02±5,02 °С) возникли в результате сбоя системы кондиционирования в помещениях промышленного свиного комплекса и продолжались в течение шести недель. Наибольший негативный эффект проявился у свиноматок, подвергшихся максимальному тепловому стрессу во время осеменения (II группа) – у них наблюдали снижение оплодотворяемости по сравнению с I группой на 4,6 %, увеличение количества слабых поросят – на 2,5 и 6,1 % по отношению к I и III группам, мертворожденных – соответственно на 4,3 и 4,1 %; количество мумифицированных поросят было больше по отношению к III группе. У свиноматок, подвергшихся воздействию высоких температур до осеменения (III группа), отмечено увеличение слабых поросят по отношению к I группе на 3,7 %. У свиноматок, осемененных до теплового воздействия (I группа), негативных последствий на репродуктивные показатели не обнаружено.

Ключевые слова: оплодотворяемость, многоплодие, поросята, осеменение, тепловое воздействие

Благодарности: исследование выполнено 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: Гудков С. Н., Горб Н. Н., Зайко О. А., Ермакова Л. П., Интханухак А. Влияние теплового стресса на репродуктивные качества свиноматок крупной белой породы. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(1):166–173. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.166-173>

Поступила: 03.10.2024

Принята к публикации: 19.02.2025

Опубликована онлайн: 26.02.2025

Effect of thermal stress on the reproductive qualities of large white breed sows

© 2024. Sergey N. Gudkov , Natalya N. Gorb, Olga A. Zajko, Ludmila P. Ermakova, Anton Intkhanukhak
Novosibirsk State Agricultural University, Novosibirsk, Russian Federation

The work is devoted to the study of reproductive qualities of sows subjected to heat stress after insemination during the period of insemination and before insemination (I, II and III groups, respectively). The breeding reproducer maintains a constant temperature in the range of 18.0...21.0 °C. Heat stress conditions (22.08±4.28...25.02±5.02 °C) arose as a result of a malfunction in the air conditioning system in the premises of an industrial pig complex and lasted for six weeks. The greatest negative effect was observed in sows subjected to maximum heat stress during insemination (II group) – they had a decrease in fertility compared to the I group by 4.6 %, an increase in the number of underdeveloped piglets – by 2.5 and 6.1 % compared to the I and III groups, stillborns – by 4.3 and 4.1 %, respectively; the number of mummified piglets was also higher compared to the III group. In sows exposed to high temperatures before insemination (III group), there was an increase in underdeveloped piglets compared to the I group by 3.7 %. In sows inseminated before exposure to heat (I group), no negative consequences were found for their reproductive indicators.

Keywords: conception rate, prolificacy, piglets, insemination, thermal effects

Acknowledgements: the research was carried out without financial support within initiative theme.

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: Gudkov S. N., Gorb N. N., Zajko O. A., Ermakova L. P., Intkhanukhak A. Effect of thermal stress on the reproductive qualities of large white breed sows. *Agrarnaya nauka Euro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):166–173. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.166-173>

Received: 03.10.2024

Accepted for publication: 19.02.2025

Published online: 26.02.2025

Стрессы, сопряженные с действием различных экологических, в том числе температурных факторов, являются одной из актуальных проблем современного животно-

водства. Д. С. Поллманн (D. S. Pollmann, 2010) отмечает, что ежегодно в США потери от теплового стресса в свиноводстве составляют почти 1 млрд долларов [1].

Проблема с течением времени приобретает все более актуальное значение, так как одним из опасных последствий изменения климата является увеличение количества экстремальных погодных явлений и сопряженная с ним уязвимость климатически зависимых отраслей. Важность этого вопроса нашла свое отражение в Климатической доктрине, в которой обозначены пути адаптации сельского хозяйства к изменениям климата [2]. Также имеет смысл отметить, что селекция на повышение продуктивности делает животных более уязвимыми к тепловому стрессу, так как оно сопряжено с активизацией метаболических процессов, которые сопровождаются выработкой тепла [3].

Механизм развития теплового стресса напрямую связан со стремлением организма снизить выработку тепла, поэтому животное при повышении окружающей температуры потребляет корма в меньшем объеме [4]. Однако такая поведенческая реакция является не единственным фактором, оказывающим влияние на продуктивность. Л. Х. Баумгард и др. (L. H. Baumgard et al., 2011) отмечают, что снижение удоев у лактирующих коров, находящихся в состоянии теплового стресса, только на 50 % может быть объяснено уменьшением потребления корма [5].

Тепловой стресс запускает в организме широкое разнообразие процессов, провоцирующих метаболические и физиологические последствия, негативным образом сказывающихся на продуктивности сельскохозяйственных животных. Э. Дж. Майорга с соавт. (E. J. Mayorga et al., 2020) утверждают, что большинство негативных последствий теплового стресса связаны с кишечником, точнее с нарушением целостности кишечного барьера [6]. Патогенез этого явления связан с перераспределением кровотока от желудочно-кишечного тракта к периферии с целью увеличения теплоотдачи. Этот процесс провоцирует гипоксию в кишечнике, что в свою очередь способствует накоплению свободных радикалов и ухудшению его архитектуры на клеточном уровне. Через такой «протекающий кишечник» («leaky gut») в организм проникают пищевые и микробные антигены и токсины, запуская физиологические и патофизиологические реакции практически во всех органах и системах [7].

Имеющиеся исследования подтверждают большое разнообразие негативных последствий теплового стресса на продуктивность.

В частности, в свиноводстве потери дохода обусловлены снижением темпов роста, изменением состава туши, снижением производительности свиноматок, увеличением заболеваемости и смертности поросят, ухудшением спермопродукции хряков [8, 9, 10, 11].

Репродуктивная система в этом отношении особенно уязвима. Здесь механизмы негативного влияния теплового стресса нашли широкий спектр приложения. Спровоцированная тепловым стрессом гиперинсулинемия качественно преобразует метаболизм яичников, приводя к стимуляции стероидогенеза и, как следствие, сезонному бесплодию [12, 13]. Проникшие через «протекающий кишечник» эндотоксины повышают атрезию фолликулов с последующим уменьшением пула примордиальных фолликулов и снижают уровень гонадотропин-рилизинг-гормона с соответствующими последствиями. Повышенная индукция простагландина F2 α , спровоцированная все теми же эндотоксинами, вызывает преждевременный лютеолиз [14].

В работах, посвященных роли теплового стресса в свиноводстве, приводятся данные о способности этого деструктивного фактора снижать показатели оплодотворения и жизнеспособности эмбрионов, а также веса поросят после отъема [15]. Дж. Р. Росс и др. (J. R. Ross et al., 2015) утверждают, что тепловой стресс у свиней в процессе беременности навсегда изменяет метаболизм и состав тела потомства после рождения, оказывая таким образом отдаленные последствия [8]. Здесь же приводятся данные о провоцировании тепловым стрессом задержки наступления половой зрелости у свинок, увеличения интервала между отъемом и течкой, а также снижения показателей беременности и опороса.

Цель исследования – изучение влияния теплового стресса на некоторые репродуктивные показатели свиноматок крупной белой породы, осемененных до, во время и после воздействия высоких температур в условиях промышленного комплекса.

Научная новизна – в результате проведенных исследований установлено, что репродуктивные качества свиноматок крупной белой породы наиболее уязвимы к воздействию теплового стресса в период оплодотворения.

Материал и методы. Исследования проводили в европейской части России на базе племрепродуктора. Постоянный температурный режим в племрепродукторе свинокомплекса

поддерживали в пределах 18,0...21,0 °С. Повышение температуры в репродукторе выше оптимальных значений возникло в летнее время в результате сбоя в системе вентилирования и кондиционирования, при этом температура была в пределах 22,08±4,28 ...25,02±5,02 °С. Динамику температур в производственных помещениях регистрировали в программе управления вентилированием Valtonic.

Исходные данные по температурам в помещениях репродуктора представлены значениями трех средних арифметических по каждой неделе опыта согласно времени производимых измерений: утро, полдень и вечер. На основании этих данных провели расчет средних значений температур по каждой неделе.

Объектом исследований служили свиноматки крупной белой породы, пришедшие в охоту и осемененные до теплового стресса, во время теплового стресса и после него. В соответствии с этим животные были разделены на три группы: 1-я – свиноматки, осемененные с 1-й по 5-ю неделю эксперимента; 2-я – свиноматки, осемененные с 6-й по 11-ю неделю опыта (время воздействия высоких температур); 3-я – свиноматки, осемененные после теплового стресса (12-я и 13-я недели). В сформированных группах определяли следующие показатели: оплодотворяемость; многоплодие; количество живых, деловых, слаборазвитых и мертворожденных поросят; количество мумифицированных поросят учитывали отдельно. Всего в эксперименте получены данные за 13 недель по 531 свиноматке.

Сперма хряков, используемая для осеменения, соответствовала требованиям нормативно-технической документации (ГОСТ 33827-2016¹).

Статистическую обработку данных и построение графиков выполняли с использованием языка программирования R в среде R-Studio. При выборе методов статистической обработки проводили проверку данных на соответствие нормальному распределению по методу Шапиро-Уилка (Shapiro–Wilk test). Ввиду несоответствия большинства признаков гауссовскому распределению, расчеты на достоверность различий проводили с использованием критерия Краскела-Уоллиса (Kruskal Wallis test) и теста Данна (Dunn test) – непараметрического

эквивалента однофакторного дисперсионного анализа². Расчет распределения живых, деловых, слаборазвитых и мертворожденных поросят в исследуемых группах проводили с использованием критерия χ^2 (хи-квадрат) с поправкой Йетса (Yates) на непрерывность; влияние среднесуточных температур в помещении на оплодотворяемость свиноматок определяли с помощью критерия Фишера³.

Результаты и их обсуждение. В племярепродукторе поддерживается постоянная температура в пределах 18,0...21,0 °С за счет программы климатического контроля Valtonic, работающей в комплексе с промышленными кондиционерами Ferroli FTP.

На рисунке 1 представлена динамика среднесуточных температур в помещениях племярепродуктора за исследуемый период.

Из рисунка 1 видно, что с 1-й по 5-ю неделю средние значения температур в помещениях племярепродуктора находились в пределах от 19,31±0,18 до 21,11±1,79 °С. То есть в этот период система кондиционирования поддерживала температуру в помещениях на приемлемом уровне. На 6-ой неделе среднее значение температур увеличилось до 25,02±5,02 °С; высокий коэффициент вариации (11,96) свидетельствует о широких колебаниях температур в этот период. С 7-й по 9-ю недели температура в помещениях была стабильно высокой – от 23,56±2,10 до 23,88±1,67. На 10-й неделе наблюдали некоторое снижение средних значений до 22,08±4,28 при достаточно значительной изменчивости этого показателя (CV = 19,37). В период 11-ой недели повышенные температуры еще сохранялись – 23,52±3,81. Только на 12-13-й неделе температура снизилась до приемлемых величин – от 20,61±1,73 до 21,09±2,08.

В таблице 1 приведены данные по осеменению, оплодотворяемости и опоросам свиноматок исследуемых групп.

Проведенный тест Фишера показал (табл. 1) что процент оплодотворившихся свиноматок во второй группе получили ниже ($p = 0,029$) на 4,6 %, чем у свиноматок, оплодотворившихся до воздействия высоких температур. Различий по этому признаку у других групп не наблюдали.

¹ГОСТ 33827-2016. Сперма хряков свежеполученная, разбавленная. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2016. 7 с. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293752/4293752082.pdf>

²Dinno A. Package “dunn.test.” In: CRAN Repos [Internet]. DOI: <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.dunn.test>

³Мастицкий С. Э., Шитиков В. К. Статистический анализ и визуализация данных с помощью R. Хальдельберг-Лондон-Тольятти, 2014. 497 с. URL: <http://r-analytics.blogspot.com>

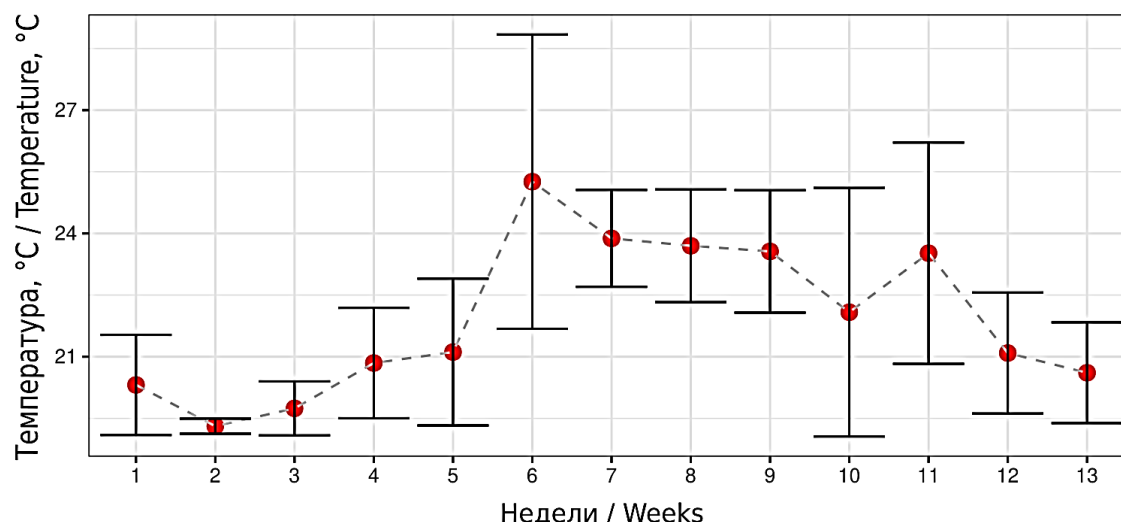


Рис. 1. Динамика температуры в помещениях племярепродуктора за исследуемый период: точки – средние арифметические температур за неделю; «усы» – ошибки средних арифметических /

Fig. 1. Temperature dynamics in the rooms of the breeding reproducer during the studied period: dots represent – the average weekly temperatures; "whiskers" – indicate errors of arithmetic means.

Таблица 1 – Оплодотворяемость свиноматок, осемененных при разных температурах в племярепродукторе /
Table 1 – Fertilization of sows inseminated at different temperatures in a breeding reproducer

Группа / Group	Свиноматки, гол / No. of sows, heads				Оплодотво- ряемость, % / Conception rate, %	Опоро- сов, % / Farrowings, %
	осемененные / inseminated	прохолостившиеся / non-pregnant	выбывшие / culled	опоросив- шиеся / farrowed		
1	227	6	3	218	97,36*	96,04
2	221	16	6	199	92,76	90,05
3	83	3	0	80	96,39	96,39

Примечания: здесь и далее звездочками (*, **, ***) обозначается уровень значимости различий по сравнению со 2-й группой; решеткой (#, ##, ###) – уровень значимости различий между 1-й и 3-й группами. Температурные диапазоны на момент осеменения: 1-я группа – 19,31±0,18...21,11±1,79 °C; 2-я группа – 22,08±4,28...25,02±5,02 °C; 3-я группа – 20,61±1,73...21,09±2,08 °C /

Notes: here and throughout asterisks (*, **, ***) denote the level of significance of differences compared to group 2; the grid (#, ##, ###) denote the level of significance of differences compared to group 3 with group 1. Temperature ranges at the time of insemination: group 1 – 19.31±0.18...21.11±1.79 °C; group 2 – 22.08±4.28...25.02±5.02 °C; group 3 – 20.61±1.73...21.09±2.08 °C

В таблице 2 приведены данные по многоплодию, количеству живых и деловых поросят.

Проведенный тест Шапиро-Уилка показал, что распределение по рассматриваемым признакам во всех выборках отличается от нормального. Средние арифметические не сильно отличаются от медианных значений; тепловой стресс не оказывал существенного влияния на изменчивость.

Свиноматки, подвергшиеся тепловому стрессу (2-я группа) отстают от свиноматок первой и второй групп по всем трем рассматриваемым признакам. В то же время у свиноматок 1-й группы по многоплодию и количеству живых поросят по сравнению с 3-й группой различий не отмечено; однако количество деловых поросят у свиноматок 3-й группы было выше, чем у 1-й группы ($p = 0,002$), оплодотворившейся до воздействия теплового стресса.

Данные по количеству слаборазвитых, мертворожденных и мумифицированных поросят приведены в таблице 3.

Количество слаборазвитых и мертворожденных поросят у свиноматок 2-й группы больше, чем у свиноматок двух других групп. У свиноматок 2-й группы количество мумифицированных поросят больше, чем у свиноматок 3-й группы ($p = 0,029$) и видна тенденция к увеличению по сравнению с 1-й группой ($p = 0,081$). Что касается различий у свиноматок 1-й и 3-й групп, то здесь они проявились по слаборазвитым поросятам – в 1-й группе этот показатель был выше, чем в 3-й ($p = 0,012$).

Соотношение живых, деловых, слаборазвитых и мертворожденных поросят в исследуемых группах представлено в таблице 4.

Таблица 2 – Многоплодие, количество живых и деловых поросят свиноматок крупной белой породы, осемененных при разных температурах в племеннорепродукторе, гол /
Table 2 – Prolificacy, the number of live and viable piglets of large white breed sows inseminated at different temperatures in a breeding reproductor, heads

Группа / Group	n	$\bar{X} \pm S_{\bar{x}}$	σ	Me	Lim	Q ₁	Q ₃	IQR
Многоплодие / Litter								
1	218	13,66±0,15**	2,29	14	5–19	13	14	2
2	199	13,19±0,15	2,05	13	6–19	12	13	2
3	80	13,99±0,20***	1,81	14	8–17	13	15	2
Живых поросят / Live piglets								
1	218	12,93±0,15***	2,27	13	5–16	12	13	2
2	199	11,92±0,14	2,00	12	6–16	11	12	2
3	80	13,21±0,19***	1,72	14	7–16	12	14	2
Деловых поросят / Viable piglets								
1	218	11,75±0,15***	2,24	12	5–16	11	12	2
2	199	10,45±0,14	1,94	11	3–15	9	11	3
3	80	12,51±0,21*** ###	1,92	13	3–15	12	14	2

Примечания: здесь и далее n – обозначает объем выборки; $\bar{X} \pm S_{\bar{x}}$ – среднее арифметическое ± ошибка средней арифметической; σ – стандартное отклонение; Me – медиана; Lim – максимальное и минимальное значения признака в выборке; Q₁ – первый квартиль; Q₃ – третий квартиль; IQR – межквартильный размах. Температурные диапазоны на момент осеменения: 1-я группа – 19,31±0,18...21,11±1,79 °C, 2-я группа – 22,08±4,28...25,02±5,02 °C, 3-я группа – 20,61±1,73...21,09±2,08 °C /

Notes: here and further, n denotes the sample size; $\bar{X} \pm S_{\bar{x}}$ is the arithmetic mean plus-minus the standard error of the mean; σ is the standard deviation; Me is the median; Lim represents the maximum and minimum values of the trait in the sample; Q₁ is the first quartile; Q₃ is the third quartile; IQR stands for interquartile range. Temperature ranges at the time of insemination: group 1 – 19.31±0.18...21.11±1.79 °C, group 2 – 22.08±4.28... 25.02±5.02 °C, group 3 – 20.61±1.73...21.09±2.08 °C

Таблица 3 – Количество слаборазвитых, мертворожденных и мумифицированных поросят в помете свиноматок крупной белой породы, осемененных при разных температурах в племеннорепродукторе, гол /
Table 3 – The number of underdeveloped, stillborn, and mummified piglets in a litter of large white breeds inseminated at different temperatures in a breeding reproductor, heads

Группа / Group	n	$\bar{X} \pm S_{\bar{x}}$	σ	Me	Lim	Q ₁	Q ₃	IQR
Слаборазвитых поросят / Underdeveloped piglets								
1	218	1,18±0,10**	1,40	1	0–8	0	1	2
2	199	1,47±0,10	1,45	1	0–8	0	1	2
3	81	0,70±0,09*** #	0,79	1	0–5	0	1	1
Мертворожденных поросят / Stillborn piglets								
1	218	0,72±0,06***	0,95	0	0–4	0	0	1
2	199	1,27±0,09	1,27	1	0–5	0	1	2
3	81	0,78±0,11**	0,98	1	0–5	0	1	1
Мумифицированных поросят / Mummified piglets								
1	218	0,09±0,02	0,32	0	0–2	0	0	0
2	199	0,16±0,03	0,48	0	0–3	0	0	0
3	81	0,05±0,02*	0,22	0	0–1	0	0	0

Таблица 4 – Процентное соотношение живых, деловых, слаборазвитых и мертворожденных поросят у свиноматок разных групп, гол (%) /

Table 4 – Percentage of live, viable, underdeveloped, and stillborn piglets of sows from different groups, heads (%)

Группа / Group	Поросят всего / Total number of piglets	Живых / Live	Деловых / Viable	Слаборазвитых / Underdeveloped	Мертворожденных / Stillborn
1	2977 (100)	2819 (94,7)***	2562 (86,1)****##	257 (8,6)****##	158 (5,3)***
2	2625 (100)	2372 (90,4)	2080 (79,2)	292 (11,1)	253 (9,6)
3	1119 (100)	1057 (94,5)***	1001 (89,5)***	56 (5,0)***	62 (5,5)***

Расчет критерия хи-квадрат по данным, приведенным в таблице 4, показал существенное влияние теплового стресса на соотношение живых и мертворожденных поросят во 2-й группе по сравнению с 1-й ($p < 0,001$) и 3-й группами ($p < 0,001$). Между 1-й и 3-й группами по этим показателям различий не отмечено. По соотношению деловых и слаборазвитых поросят различия отмечены во всех трех группах (во всех случаях $p < 0,001$).

Таким образом, количество мертворожденных поросят во 2-й группе по сравнению с 1-й и 3-й больше на 4,3 и 4,1 % соответственно, слаборазвитых поросят больше всего в группе, подвергшейся тепловому стрессу во время осеменения – разница по процентам составила 2,5 и 6,1 % соответственно. Слаборазвитых поросят в 1-й группе больше, чем в 3-й на 3,6 %. Визуально распределение поросят по группам свиноматок представлено на рисунке 2.

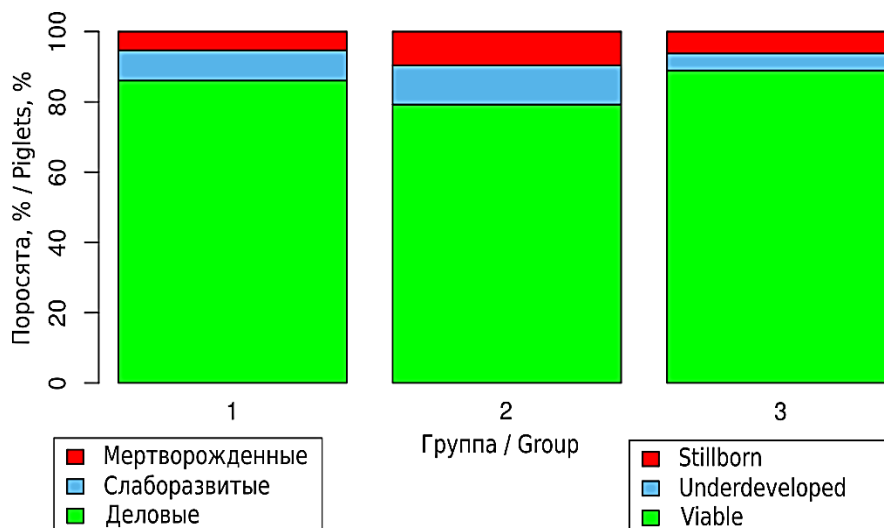


Рис. 2. Процентное соотношение деловых, слаборазвитых и мертворожденных поросят в исследуемых группах /

Fig. 2. Percentage of live, viable, underdeveloped, and stillborn piglets among sows in groups under study

В представленном исследовании все три группы свиноматок подверглись воздействию теплового стресса: после, во время и до оплодотворения. Наибольший ущерб был нанесен репродуктивным показателям свиноматок, подвергшихся тепловому стрессу во время оплодотворения (2-я группа), наименьший – после теплового воздействия (3-я группа).

В. Хлопцкий (2022) упоминает следующие естественные критические периоды у свиноматок, определяющие потери супоросности в эмбриональный период: первый период определяется биологической неодинаковостью (разнокачественностью) зародышей – часть из них оказывается неполноценной вследствие наследственных факторов или неполноценности

половых клеток; второй период наступает на 5-6-ой день после оплодотворения как следствие разрыва прозрачной оболочки; третий период – имплантация эмбриона в слизистую оболочку (10-13-ый день после оплодотворения); четвертый период длится около 30 суток и связан с образованием плацентарной связи, закладкой органов и систем организма [16].

У свиноматок 1-й группы негативный эффект выразился в снижении процента деловых и увеличении слаборазвитых поросят. На момент воздействия теплового стресса у большинства животных этой группы уже произошло оплодотворение, и нидация зародышей. Вероятно поэтому здесь наблюдали более высокий процент оплодотворяемости по сравнению

со свиноматками 2-й группы, увеличение количества слабобразвитых поросят по сравнению со свиноматками 3-й группы, по-видимому, связано с негативным эффектом теплового стресса на формирование плацентарной связи и закладку основных систем организма (четвертый критический период).

Первые три критических периода из вышеперечисленных приходятся на период теплового стресса у свиноматок 2-ой группы. Кроме того, учитывая, что воздействие теплового стресса продолжалось в течение 6 недель, то и формирование системы мать-плод также, как и у свиноматок 1-й группы, приходилось на период теплового стресса, за исключением свиноматок, оплодотворенных на 10-11 неделях. Также у большинства свиноматок этой группы формирование и созревание фолликулов приходилось на этот промежуток времени. Таким образом, у свиноматок 2-й группы наблюдали негативный эффект практически по всем рассмотренным показателям: снижение оплодотворяемости и многоплодия; увеличение количества слабобразвитых, мертворожденных и мумифицированных поросят при соответственном снижении выхода живых и деловых поросят.

В литературе имеется достаточное количество данных, описывающих целый каскад физиологических эффектов в яичниках под влиянием теплового стресса. Выше упоминались работы, раскрывающие причины сезонного бесплодия свиноматок, спровоцированного тепловым стрессом [12, 13, 14]. Однако в настоящем исследовании у свиноматок 3-й группы, оплодотворившихся после шести недель воздействия теплового стресса, негативных последствий, в свете рассматриваемых признаков репродуктивности, не отмечалось. В частности, оплодотворяемость и многоплодие свиноматок, осемененных после теплового стресса не отличались от таковых у свиноматок, осемененных до теплового воздействия (табл. 1). Отсутствие

выраженных последствий в данном случае вероятно связано с тем, что физиологические изменения в яичниках не достигли критического значения, способного повлиять на фолликулогенез. В пользу такого предположения можно привести данные Э. Дж. Майорга с соавт. (E. J. Mayorga et al., 2011), которые в своей работе указывали, что определение критических значений индекса температуры и влажности (ТНП), способных оказывать негативный эффект на те или иные репродуктивные показатели, в свиноводстве затруднен в силу различных факторов: возрастных особенностей; физиологического состояния и степени жировых отложений [6]. Снижение оплодотворяемости и многоплодия во 2-й группе свиноматок, в свете приведенного предположения, видится как результат повышенной эмбриональной смертности.

Заключение. Максимальный деструктивный эффект на репродуктивные показатели тепловой стресс оказал в период осеменения свиноматок (2-я группа; температурный диапазон – $22,08 \pm 4,28 \dots 25,02 \pm 5,02$ °C). В сравнении со свиноматками, осемененными до теплового воздействия (1-я группа; температурный диапазон – $19,31 \pm 0,18 \dots 21,11 \pm 1,79$ °C) у свиноматок, осемененных во время действия высоких температур (2-я группа), наблюдали снижение оплодотворяемости на 4,6 % ($p = 0,029$). В сравнении со свиноматками, подвергшимся тепловому воздействию до (1-я группа) и после (3-я группа; температурный диапазон – $20,61 \pm 1,73 \dots 21,09 \pm 2,08$ °C) осеменения у свиноматок, осемененных во время действия высоких температур, наблюдали также снижение многоплодия на 3,5 и 6,1 % ($p \leq 0,01$ и $p \leq 0,001$), увеличение количества слабобразвитых поросят на 2,5 и 6,1 % ($p \leq 0,01$ и $p \leq 0,001$) и мертворожденных на 4,3 и 4,1 % ($p \leq 0,001$ и $p \leq 0,01$) при снижении живых на 4,3 и 4,1 % ($p \leq 0,001$ и $p \leq 0,001$) и деловых поросят на 6,9 и 10,3 % ($p \leq 0,001$ и $p \leq 0,001$).

References

1. Pollman D. S. Seasonal effects on sow herds: industry experience and management strategies. *Journal Animal Science*. 2010;88(3):9.
2. Кислов А. В., Суркова Г. В. Влияние глобального потепления на климатические ресурсы России. *Экономика. Налоги. Право*. 2021;14(4):6–14. DOI: <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2021-14-4-6-14> EDN: SMXUOP
Kislov A. V., Surkova G. V. The impact of global warming on Russia's climate resources. *Ekonomika. Nalogi. Pravo*. 2021;14(4):6–14. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2021-14-4-6-14>
3. Brown-Brandl T. M., Nienaber J. A., Xin H., Gates R. S. A literature review of swine heat production. *Transactions of the ASAE*. 2004;47(1):259–270. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.15867>
4. Baumgard L. H., Rhoads Jr. R. P. Effects of heat stress on postabsorptive metabolism and energetics. *Annual Review of Animal Biosciences*. 2013;1(1):311–337. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-031412-103644>
5. Baumgard L. H., Wheelock J. B., Sanders S. R., Moore C. E., Green H. B., Waldron M. R., Rhoads R. P. Postabsorptive carbohydrate adaptations to heat stress and monensin supplementation in lactating Holstein cows. *Journal of Dairy Science*. 2011;94(11):5620–5633. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2011-4462>

6. Mayorga E. J., Ross J. W., Keating A. F., Rhoads R. P., Baumgard L. H. Biology of heat stress; the nexus between intestinal hyperpermeability and swine reproduction. *Theriogenology*. 2020;154:73–83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.05.023>
7. Lambert G. P. Stress-induced gastrointestinal barrier dysfunction and its inflammatory effects. *Journal of Animal Science*. 2009;87(14):E101–E108. URL: <https://doi.org/10.2527/jas.2008-1339>
8. Ross J. W., Hale B. J., Gabler N. K., Rhoads R. P., Keating A. F., Baumgard L. H. Physiological consequences of heat stress in pigs. *Animal Production Science*. 2015;55(12):1381–1390. DOI: <https://doi.org/10.1071/AN15267>
9. Mayorga E. J., Renaudeau D., Ramirez B. C., Ross J. W., Baumgard L. H. Heat stress adaptations in pigs. *Animal Frontiers*. 2019;9(1):54–61. DOI: <https://doi.org/10.1093/af/vfy035>
10. Гутман М., Горб Н., Сороколетова В. Влияние теплового стресса. *Животноводство России*. 2022;(3):27–29. DOI: <https://doi.org/10.25701/ZZR.2022.03.03.001> EDN: VUKOOD
- Gutman M., Gorb N., Sorokoletova V. Effect of thermal stress. *Zhivotnovodstvo Rossii*. 2022;(3):27–29. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25701/ZZR.2022.03.03.001>
11. Wettemann R. P., Wells M. E., Omtvedt I. T., Pope C. E., Turman E. J. Influence of elevated ambient temperature on reproductive performance of boars. *Journal of Animal Science*. 1976;42(3):664–669. DOI: <https://doi.org/10.2527/jas1976.423664x>
12. Nteeba J., Sanz-Fernandez M. V., Rhoads R. P., Baumgard L. H., Ross J. W., Keating A. F. Heat stress alters ovarian insulin-mediated phosphatidylinositol-3 kinase and steroidogenic signaling in gilt ovaries. *Biology of Reproduction*. 2015;92(6):148. DOI: <https://doi.org/10.1095/biolreprod.114.126714>
13. Dickson M. J., Hager C. L., Al-Shaibi A., Thomas P. Q., Baumgard L. H., Ross J. W., Keating A. F. Impact of heat stress during the follicular phase on porcine ovarian steroidogenic and phosphatidylinositol-3 signaling. *Journal of Animal Science*. 2018;96(6):2162–2174. DOI: <https://doi.org/10.1093/jas/sky144>
14. Bidne K. L., Dickson M. J., Ross J. W., Baumgard L. H., Keating A. F. Disruption of female reproductive function by endotoxins. *Reproduction*. 2018;155(4):R169–R181. DOI: <https://doi.org/10.1530/REP-17-0406>
15. Omtvedt I. T., Nelson R. E., Edwards R. L., Stephens D. F., Turman E. J. Influence of heat stress during early, mid and late pregnancy of gilts. *Journal of Animal Science*. 1971;32(2):312–317. DOI: <https://doi.org/10.2527/jas1971.322312x>
16. Хлопицкий В. Критические точки периода супоросности. *Животноводство России*. 2022;(12):27–30. DOI: <https://doi.org/10.25701/ZZR.2022.12.12.006> EDN: OZRCTL
- Khlopitskiy V. Critical points of the sow pregnancy time. *Zhivotnovodstvo Rossii*. 2022;(12):27–30. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25701/ZZR.2022.12.12.006>

Сведения об авторах

✉ **Гудков Сергей Николаевич**, кандидат биол. наук, доцент кафедры терапии, хирургии и акушерства, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет», ул. Добролюбова, д. 160, г. Новосибирск, Российская Федерация, 630039, e-mail: rector@nsau.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3521-7727>, e-mail: gudkovsergey@gmail.com

Горб Наталья Николаевна, кандидат вет. наук, доцент кафедры терапии, хирургии и акушерства, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет», ул. Добролюбова, д. 160, г. Новосибирск, Российская Федерация, 630039, e-mail: rector@nsau.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8854-0412>

Зайко Ольга Александровна, кандидат биол. наук, доцент кафедры терапии, хирургии и акушерства, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет», ул. Добролюбова, д. 160, г. Новосибирск, Российская Федерация, 630039, e-mail: rector@nsau.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3159-3772>

Ермакова (Сажнюк) Людмила Петровна, кандидат вет. наук, доцент кафедры фармакологии и общей патологии, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет», ул. Добролюбова, д. 160, г. Новосибирск, Российская Федерация, 630039, e-mail: rector@nsau.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2828-3957>

Интханухак Антон, аспирант кафедры фармакологии и общей патологии, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет», ул. Добролюбова, д. 160, г. Новосибирск, Российская Федерация, 630039, e-mail: rector@nsau.edu.ru

Information about the authors

✉ **Sergey N. Gudkov**, PhD in Biological Science, associate professor, the Department of Therapy, Surgery and Obstetrics, Novosibirsk State Agricultural University, Dobrolyubova Street, 160, Novosibirsk, Russian Federation, 630039, e-mail: rector@nsau.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3521-7727>, e-mail: gudkovsergey@gmail.com

Natalya N. Gorb, PhD in Veterinary Science, associate professor, the Department of Therapy, Surgery and Obstetrics, Novosibirsk State Agricultural University, Dobrolyubova Street, 160, Novosibirsk, Russian Federation, 630039, e-mail: rector@nsau.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8854-0412>

Olga A. Zajko, PhD in Biological Science, associate professor, the Department of Therapy, Surgery and Obstetrics, Novosibirsk State Agricultural University, Dobrolyubova Street, 160, Novosibirsk, Russian Federation, 630039, e-mail: rector@nsau.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3159-3772>

Ludmila P. Ermakova (Sazhnyuk), PhD in Veterinary Science, associate professor, the Department of Pharmacology and General Pathology, Novosibirsk State Agricultural University, Dobrolyubova Street, 160, Novosibirsk, Russian Federation, 630039, e-mail: rector@nsau.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2828-3957>

Anton Intkhanukhak, postgraduate student, the Department of Pharmacology and General Pathology, Novosibirsk State Agricultural University, Dobrolyubova Street, 160, Novosibirsk, Russian Federation, 630039, e-mail: rector@nsau.edu.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.174-183>



УДК 619:616.98:578.832.1:615.371:616-097.3

Профилактика гриппа птиц H5N1: инактивированная вакцина на основе антигена низкопатогенного варианта вируса против высокопатогенного штамма

© 2025. Н. В. Мороз, Д. А. Долгов, И. А. Чвала, С. В. Фролов ,
А. Д. Грехнева, В. Ю. Кулаков

ФГБУ «Федеральный центр охраны здоровья животных», г. Владимир,
Российская Федерация

Высокопатогенный грипп птиц – это острая проблема для птицеводства всего мира. Вирусы высокопатогенного гриппа являются причиной разрушительных эпизоотий, приносящих значительные экономические потери. Кроме этого, высокая вероятность реассортации вирусного генома может привести к скачкообразному расширению спектра патогенности возбудителя, который будет опасен для человека. На этом основании разработка эффективных средств специфической профилактики гриппа птиц является актуальной. Оценка защищающей способности (протективного эффекта) инактивированной вакцины против гриппа птиц (ГП) «АвиФлуВак» на основе антигена низкопатогенного вируса ГП H5N1 штамма «Ямал». Испытание в остром опыте против выделенного на территории России в 2023 г высокопатогенного вируса ГП птиц штамма A/gull/Kirov/998-1/2023 H5N1. Вакцина «АвиФлуВак», параллельно с которой в качестве референта была использована экспериментальная вакцина на основе антигена высокопатогенного вируса ГП H5N1. Обе вакцины были испытаны с разными дозами (D) соответствующих антигенов. В постоянном прививном объеме содержались следующие дозы: неразведенный антиген ($D = 1$); 1/25; 1/50; 1/100. Каждой дозой была привита отдельная группа из n-числа птиц. Через 28 суток после иммунизации в группах определили средние логарифмические титры антител ($T, \log_2$) к вирусу ГП и провели заражение высокопатогенным вирусом. В каждой группе ежедневно регистрировали долю клинически больных и погибших особей (с). Через 10 суток определяли групповые клинические показатели ($C = \Sigma c/n$) и протективные индексы ($PI = 1 - C$). Значения PI преобразовывали в линейные эквиваленты вида $f = \log(PI/(1 - PI))$. Для изучаемого и референтного препаратов строили регрессионные модели $f = k(\lg D) + f_0$, по которым рассчитали относительную концентрацию антигена, необходимую для защиты 50 % вакцинированных птиц (PD_{50}). Установили, что прививной объем вакцины «АвиФлуВак» содержал $(1,982 \pm 0,088) \lg PD_{50}$, или $\approx 96 PD_{50}$, аналогичный показатель для референтной вакцины составил $(1,581 \pm 0,122) \lg PD_{50}$, или $\approx 38 PD_{50}$. Установленные величины имели существенные различия ($p \leq 0,01$). Исследование связи между показателями f и T позволило определить, что ожидаемые титры антител, которые соответствовали защите 95 % вакцинированных птиц, для вакцины «АвиФлуВак» и референтного препарата составили статистически равные оценки ($\log_2$) – 5,85 и 6,09 соответственно.

Ключевые слова: высокопатогенный вирус гриппа птиц, инактивированные вакцины, доза антигена в вакцине, протективный эффект вакцины

Благодарность: работа выполнена за счёт средств ФГБУ «Федеральный центр охраны здоровья животных» в рамках тематики научно-исследовательских работ «Ветеринарное благополучие».

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Мороз Н. В., Долгов Д. Л., Чвала И. А., Фролов С. В., Грехнева А. Д., Кулаков В. Ю. Профилактика гриппа птиц H5N1: инактивированная вакцина на основе антигена низкопатогенного варианта вируса против высокопатогенного штамма. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(1):174–183.
DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.174-183>

Поступила: 27.08.2024

Принята к публикации: 14.02.2025

Опубликована онлайн: 26.02.2025

The prevention of H5N1 avian influenza: inactivated low pathogenicity avian influenza virus-based vaccine against high pathogenicity avian influenza virus strain

© 2025. Natalya V. Moroz, Dmitry L. Dolgov, Ilya A. Chvala, Sergey V. Frolov , Alyona D. Grekhneva, Vladimir Yu. Kulakov

Federal Centre for Animal Health (FGBI "ARRIAH"), Vladimir, Russian Federation

High pathogenicity avian influenza remains a great challenge for poultry farming industry worldwide. High pathogenicity avian influenza viruses cause devastating epizootics leading to significant economic losses. Moreover, high viral genome reassortment probability could result in abrupt virus pathogenicity expansion and the virus will become dangerous for humans. Considering this, development of specific vaccines against avian influenza is of great importance. The research was aimed at the evaluation of protective effect of "AviFluVac" inactivated vaccine against avian influenza based on H5N1 low pathogenicity AIV Yamal strain antigen. The vaccine was tested for its protective effect by challenge using H5N1 highly pathogenicity AI virus A/gull/Kirov/998-1/2023 strain isolated in Russia in 2023. "AviFluVac" vaccine used in parallel with the pilot vaccine based on H5N1 HPAI virus antigen as a reference vaccine. Both vaccines were tested at different concentrations (D) of relevant antigens. Constant vaccine inoculation volume contained undiluted antigen (D = 1); 1/25; 1/50; 1/100. Vaccine containing each antigen concentration was inoculated to a separate group of chickens (n). Mean logarithmic antibody titres (T, log₂) to avian influenza virus were determined in the groups 28 days after vaccination and then chickens were challenged with high pathogenicity avian influenza virus. Proportions of clinically diseased and dead chickens (c) were registered daily in each group. Group clinical scores (C = $\Sigma c/n$) and protective index values (PI = 1 - C) were determined 10 days after challenge. PI values were converted into linear equivalents: $f = \log(PI/(1 - PI))$. Regression models, $f = k(\lg D) + f_0$, were constructed for tested and reference vaccines and used for calculation of relative antigen concentration required for protection of 50 % of vaccinated chickens (PD₅₀). It was shown that "AviFluVac" inoculation volume contained (1.982±0.088) lgPD₅₀, or ≈ 96 PD₅₀ and reference vaccine inoculation volume contained (1.581±0.122) lgPD₅₀, or ≈ 38 PD₅₀. The calculated values were significantly different (p≤0.01). The study of the relationship between f and T values revealed that the expected antibody titers corresponding to the 95 % protection of vaccinated chickens, were statistically equal (log₂) for the AviFluVac vaccine and reference vaccine – 5.85 and 6.09 respectively.

Keywords: high pathogenicity avian influenza, inactivated vaccines, antigen concentration in the vaccine, vaccine protective effect

Acknowledgements: the study was funded by the FGBI "Federal Centre for Animal Health" as a part of research activities ("Veterinary Welfare").

The authors express their gratitude to the reviewers for their contribution to the peer review of this paper.

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

Для цитирования: Moroz N. V., Dolgov D. L., Chvala I. A., Frolov S. V., Grekhneva A. D., Kulakov V. Yu. The prevention of H5 avian influenza: inactivated low pathogenicity avian influenza virus-based vaccine against high pathogenicity avian influenza virus strain. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):174–183. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.174-183>

Received: 27.08.2024

Accepted for publication: 14.02.2025

Published online: 26.02.2025

В настоящее время высокопатогенный грипп птиц (ВПГП) – это актуальная проблема для птицеводства всего мира. Вирусы ВПГП (H5N1) являются причиной разрушительных эпизоотий, приносящих значительные экономические потери. Например, в 2022 г. в результате распространения ВПГП (H5N1) во Франции к марту было уничтожено 11 млн птиц,

в США к сентябрю 2022 г. потери превысили 20 млн голов^{1, 2}. О вспышках ВПГП (H5N1) в 2022 г. сообщили всего 67 стран на пяти континентах, что привело к потере более 131 млн голов домашней птицы³. В период апрель-июнь 2023 г. вспышки вируса ВПГП (H5N1) были зарегистрированы в 25 странах Европы у домашних и диких птиц – 98 и 634 эпизода соответственно⁴.

¹Маилян Э. С. Грипп птиц. Новый взгляд на прошлое, настоящее и будущее птицеводства. НПК Фарминдустрия. [Электронный ресурс]. URL: <https://pharminindustria.com/projects/poleznye-stati-po-veterinari/gripp-ptits-novyy-vzglyad-na-proshloe-nastoyashchee-ptizevodstva/> (дата обращения: 03.07.2024).

²Службы инспекции здоровья животных и растений Министерства сельского хозяйства США (USDA) (APHIS). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cdc.gov/flu/avianflu/poultry.htm> (дата обращения: 03.07.2024).

³Ongoing avian influenza outbreaks in animals pose risk to humans. Situation analysis and advice to countries from FAO, WHO, WOAH. 12 July 2023 Statement/Geneva/Paris/Rome. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fao.org/animal-health/news-events/news/detail/ongoing-avian-influenza-outbreaks-in-animals-pose-risk-to-humans/en> (дата обращения: 03.07.2024)

⁴Avian influenza overview April–June 2023. EFSA Journal. 2023;21(7):8191.

URL: <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/avian-influenza-overview-april-june-2023>

В РФ по данным Россельхознадзора, на 17.10.2023 г. вспышки ВПГП (H5N1) зарегистрированы: в 57 населенных пунктах (н. п.) у дикой птицы; в 6 н. п. – на птицефабриках; в 8 н. п. у домашней птицы⁵. Отмечено, что в этом году болезнь поражала нетипичные виды диких птиц, а именно, чаяк. Например, очагом заболевания в Москве стали Борисовские пруды, где были найдены погибшие чайки, из останков которых выделен геном вируса ВПГП подтипа H5N1⁶. В центральных регионах России неблагополучные птицефабрики во всех случаях находятся в непосредственной близости от н. п., где зафиксированы вспышки ВПГП (H5N1) у диких птиц⁷, что явно указывает на источник распространения вируса.

Наряду с ограничительными мерами, надежным способом борьбы с ВПГП служит специфическая профилактика болезни. Среди антигриппозных вакцин наиболее широкое распространение имеют инаktivированные цельновирионные препараты [1, 2]. Протективный эффект таких вакцин зависит от двух связанных составляющих: концентрации антигена в составе препарата и структурного соответствия между антигенами вакцины и полевого агента [2, 3]. При этом, из соображений эпизоотологической опасности, для получения антигенов рекомендуется использовать вирус низкопатогенных вариантов [4]. Примером инаktivированного препарата специфической профилактики ВПГП на основе низкопатогенного варианта вируса является вакцина «АвиФлуВак».

Цель исследований – оценка эффективности инаktivированной вакцины «АвиФлуВак» против эпизоотически актуального для России в 2023 г. вируса ВПГП H5N1.

В рамках указанной цели были поставлены следующие задачи:

- определение филогенетической принадлежности изолята вируса ВПГП, выделенного во время вспышки заболевания на территории РФ, который будет использован для испытания протективного эффекта вакцины;
- оценка количества 50%-ных протективных доз, содержащихся в прививном объеме вакцины;

- определение величины среднего титра поствакцинальных антител, обеспечивающих защиту 95 % вакцинированных птиц.

Научная новизна – проведение иммунологических исследований вакцины «АвиФлуВак» в отношении актуального, эпизоотически опасного для птицы высокопатогенного вируса гриппа птиц подтипа H5.

Материал и методы. Объект исследования – вакцина против гриппа птиц (H5), инаktivированная эмульсионная «АвиФлуВак». Активный компонент – антиген НППГ подтипа H5N1 (штамм «Ямал») в составе экстраэмбриональной жидкости (ЭЭЖ) инфицированных эмбрионов кур. В качестве контроля объекта исследования использовали экспериментальную инаktivированную эмульсионную вакцину против гриппа птиц H5 на основе антигена ВПГП подтипа H5N1 (референтная вакцина). Активный компонент – антиген ВПГП подтипа H5N1 (штамм №125-ДЕП «Новосибирский») относится к кладе 2.2 в составе экстраэмбриональной жидкости (ЭЭЖ) инфицированных эмбрионов кур. Вирусы инаktivированы аминоксилатом (0,25 %).

Получение образцов вакцин с заданной концентрацией антигена. Концентрации антигенов (D) в прививном объеме вакцин регулировали путем разведения исходных препаратов соответствующих антигенов физиологическим раствором в соотношении: 1:25, 1:50 и 1:100 (D = 25; D = 50 и D = 100), а также не разведенные антигены (D = 1). Далее полученные препараты антигенов эмульгировали в соотношении 30/70 в масляном адъюванте Montanide ISA 70 VG. Смешивание с разбавителем проводили в лабораторном гомогенизаторе тканей при 6000 оборотах в течение 10 минут. Стабильность эмульсии после смешивания оценивали центрифугированием при 1000 g в течение 10 минут. Значение 1000 g регламентировано стандартом организации (СТО) и достаточно для оценки показателя «стабильность» полученного типа эмульсии. Эмульсию считали стабильной, если отслоение легкой (масляной) фракции не превышало 5 % по объему, а отслоение тяжелой (водной) фракции не происходило.

⁵Вспышки ВПГП на территории РФ в 2023 г. (данные Россельхознадзора). [Электронный ресурс].

URL: <https://fsvps.gov.ru/wp-content/uploads/2023/10/%D0%92%D0%9F%D0%93%D0%9F-%D0%BD%D0%B0-17.10.2023-scaled.jpg> (дата обращения: 03.07.2024).

⁶Грипп птиц Борисовские пруды. Информационный портал Дзен. [Электронный ресурс].

URL: <https://dzen.ru/search?query=грипп%20птиц%20борисовские%20пруды&sid=310585425165382784/> (дата обращения: 26.08.24)

⁷URL: <https://www.fao.org/animal-health/news-events/news/detail/ongoing-avian-influenza-outbreaks-in-animals-pose-risk-to-humans/en>

Птица. Цыплята яичного кросса Ломан Браун в возрасте 4 недель серонегативные к вирусу ГП. Работу с птицей проводили в соответствии с ГОСТ 33215-2014⁸, а также согласно требованиям Директивы 2010/63/EU (от 22.09.10)⁹ по охране животных, используемых в научных целях.

Иммунизация птиц. Каждый образец вакцины с заданной концентрацией антигена был испытан на отдельной группе птиц численностью не менее 10 голов. Препарат вводили внутримышечно в область груди в объеме 0,5 см³. Дополнительно образовали группу контроля вируса численностью 10 голов, в которой иммунизацию не проводили (интактные птицы). Группы птиц содержали в изолированных настольных боксах с автономной вентиляцией, подачей воды и корма.

Эмбрионы кур. Развивающиеся 9–11-суточные эмбрионы кур категории СПФ (VALO BioMedia GmbH, Германия).

Выделение вируса гриппа птиц. Использовали патматериал, полученный из эпизоотического очага (пробу внутренних органов погибшей дикой птицы). На фосфатном буфере (рН 7,2–7,4) готовили 10–20 %-ную тканевую суспензию, которую центрифугировали в течение 15 мин при 1000 g. В супернатант добавляли антибиотики (100 Ед/мл бензилпенициллина натриевой соли, 100 мкг/мл стрептомицина сульфата и 50 Ед/мл нистатина). Полученный материал вводили в аллантоисную полость куриных эмбрионов в объеме 0,2 см³. Инокулированные эмбрионы инкубировали при 37 °C и относительной влажности 60–70 %. Ежедневно проводили овоскопию. Эмбрионы, погибшие после 24 ч инкубации и более, использовали для сбора экстраэмбриональной жидкости. Специфичность гибели подтверждали исследованием ЭЭЖ в реакции гемагглютинации. Положительно реагирующие образцы ЭЭЖ считали вирусным материалом.

Определение титра инфекционного вируса на эмбрионах кур. Использовали метод предельных разведений. Готовили последовательные десятикратные разведения вирусного материала на фосфатном буфере (рН 7,2–7,4).

Каждое разведение тестировали на группе эмбрионов ($n \geq 5$). Материал инокулировали в аллантоисную полость в объеме 0,2 см³. Положительной реакцией (присутствие вируса) считали гибель эмбриона, установленную после более чем 24-х часов инкубации. Расчет величины титра проводили по Керберу и выражали в ЭИД₅₀/см³.

ОТ-ПЦР. Суммарную РНК выделяли, используя набор RNeasy Mini Kit (Qiagen, кат. №74106), в соответствии с инструкцией производителя. ОТ-ПЦР проводили в одну стадию с помощью набора OneStep RT-PCR Kit (Qiagen, кат. № 210212) с соответствующими системами праймеров для выявления генома вируса гриппа птиц и идентификации подтипа H5N1.

Секвенирование генома вируса. Нуклеотидные последовательности фрагментов генов определяли с применением автоматического секвенатора ABI Prism 3130 (Applied Biosystems, США). Анализ и сравнение нуклеотидных и соответствующих им аминокислотных последовательностей проводили, используя пакет прикладных программ BioEdit, версия 7.0.5.3. Также для сравнительного анализа использовали ранее опубликованные [<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/genomes/FLU/Database/>] в международной базе GenBank последовательности изолятов и штаммов вируса гриппа птиц А/Н5. Построение и редактирование филогенетического дерева осуществляли с помощью алгоритма NJ в реализации пакета MEGA, версия 7.

Реакция гемагглютинации (РГА). Пробы антигенсодержащих материалов исследовали в РГА в соответствии с методикой, изложенной в Руководстве ВОЗЖ для наземных животных для вакцин и диагностикумов [4]. Определяли титр гемагглютинирующих единиц (ГАЕ).

Реакция торможения гемагглютинации (РТГА). Пробы сывороток крови птиц исследовали в РТГА согласно методике, изложенной в Руководстве ВОЗЖ для наземных животных для вакцин и диагностикумов [4]. Определяли величину титра антител. Положительной считали реакцию, где показатель титра имел оценку 1:16 и более, т. е. $4 \log_2$.

⁸ГОСТ 33215-2014. Руководство по содержанию и уходу за лабораторными животными. Правила оборудования помещений и организации процедур. М.: Стандартинформ, 2016. 19 с.

URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293757/4293757886.pdf?ysclid=m6uqrsfuxj368295094>

⁹Директива Европейского парламента и Совета Европейского Союза 2010/63/ЕС от 22 сентября 2010 г. о защите животных, использующихся для научных целей. [Электронный ресурс].

URL: <https://base.garant.ru/70350564/?ysclid=m6uqoqheah373369825> (дата обращения: 26.08.2024).

Заражение птиц. В группах иммунизированных и интактных птиц проводили контрольное заражение через 28 суток после вакцинации. Для заражения использовали вирус ВПГП H5N1 штамм A/gull/Kirov/998-1/2023 H5N1 в дозе 6,0 lg ЭИД₅₀. Вирусный материал вводили внутримышечно в область бедра в объеме 0,5 см³. Наблюдения клинического состояния зараженной птицы продолжали в течение 10 суток.

Обработка экспериментальных данных. Использовали общепринятые способы обработки выборок варьирующих переменных (определяли средние значения, стандартные отклонения и стандартные ошибки средних). Применяли элементы регрессионного анализа. Описание специальных статистических методов дано в тексте. Вычислительные операции и графические построения выполняли в приложении Excel.

Результаты и их обсуждение. Выделение вируса, оценка вирулентности и определение филогенетической принадлежности штамма. Установили, что исследуемый биологический материал содержал инфекционный вирус, который был летальным для эмбрионов (специфический падеж составил 23/30). Полученные пробы ЭЭЖ демонстрировали положительную РГА (от 1:64 до 1: 256) и по результатам ОТ-ПЦР содержали высокую концентрацию генома вируса гриппа птиц (средняя оценка Ct = 18).

Сайт расщепления гемагглютинаина выделенного вируса гриппа имел структуру -REKRRKR-, что позволило охарактеризовать его как потенциально высоковирулентный.

Внутривенная инъекция вирусосодержащей ЭЭЖ (10-кратное разведение на фосфатном буфере) в объеме 0,1 см³ 10 цыплятам в возрасте 5 недель (серонегативным к вирусу гриппа птиц) показала, что в течение последующих 10 суток 9 цыплят (90 %) погибли при наличии характерных для ВПГП клинических признаков (диарея, выделение из носа, цианоз неоперенных участков кожи). Специфичность падежа подтверждена ОТ-ПЦР, где в материале показано присутствие генома вируса ВПГП. Полученные результаты соответствовали клиническим критериям проявления ВПГП [4].

При проведении сравнительного генетического анализа нуклеотидных последовательностей фрагмента гена НА определили, что вирус A/gull/Kirov/998-1/2023 принадлежит

к азиатской генетической линии вируса ВПГП подтипа H5, клада 2.3.4.4.b, получившего эпизоотическое распространение в предыдущие годы в странах Азии, Европы, Африки, Северной и Южной Америки. Выделенный вирус был определен как штамм вируса гриппа птиц A/gull/Kirov/998-1/2023 H5N1. Положение штамма в структуре филогенетического дерева показано на рисунке 1.

Согласно данным международных баз GenBank и GISAID(EpiFlu), наиболее генетически близкими к A/gull/Kirov/998-1/2023 H5N1 являются вирусы подтипа H5N1, выявленные в 2023 году на территории ряда европейских стран. Исходя из сроков выявления на территории европейских стран (февраль – май 2023 года, по данным базы GISAID (EpiFlu)) идентичные изоляты активно циркулировали уже несколько месяцев – как минимум с начала 2023 года.

Таким образом, учитывая распространение вируса гриппа H5N1 в регионе, а также занос и распространение инфекции в ряде регионов Российской Федерации, в дальнейшей работе использован вирус A/gull/Kirov/998-1/2023 H5N1.

Оценка иммунологических показателей вакцин. Все образцы вакцин, содержащие заданные концентрации антигенов, были испытаны на птицах параллельно. Через 28 суток после вакцинации определяли средние по группам логарифмические титры антител к вирусу ГП, установленные в РТГА (log₂T).

Далее во всех подопытных группах птиц провели заражение штаммом A/gull/Kirov/998-1/2023 H5N1. В течение 10 суток в каждой группе ежедневно определяли текущие оценки клинических показателей ($c = a + b$, где a и b – количество клинически больных и погибших птиц соответственно). По окончании срока наблюдений в группах определяли накопленные клинические показатели ($\sum c/n$, где n – число птиц в группе до заражения) и вычисляли индексы защиты (протективные индексы) вида $PI = 1 - \sum c/n$.

Показатели иммунологического действия исследуемых вакцин, установленные в подопытных группах птиц приведены в таблице.

Исследовали связь (зависимость) между дозой антигена и протективным индексом. Для приближения зависимости параметров D и PI к линейному виду значения D выражали в логарифмах ($\lg D$), а величины PI преобразовывали

в линейные эквиваленты по Берксона¹⁰ вида $f = \lg (PI / (1 - PI))$. Таким образом, 50%-ный протективный эффект вакцины ($PI = 0,5$) соответствовал эквиваленту $f = 0$. Для значений $PI = 1$ использовали условные оценки $PI_i = (1 - 1/5^n)^{11}$.

Для построения наиболее вероятных моделей связи показателей IgD и f применили регрессионный анализ¹². Получили линейные

регрессионные уравнения, имеющие вид: $f = (-1,017)IgD + 2,016$ – для антигена НППП ($R^2 = 0,932$) и $f = (-1,079)IgD + 1,706$ – для антигена ВППП ($R^2 = 0,967$), где f – прогнозируемое значение индекса соответственно заданного IgD . Для графического представления регрессии PI и IgD использовали обратное преобразование f в размерность доли по формуле $PI = 1 - 1 / (1 + (\text{antilg } f))$ (рис. 2).

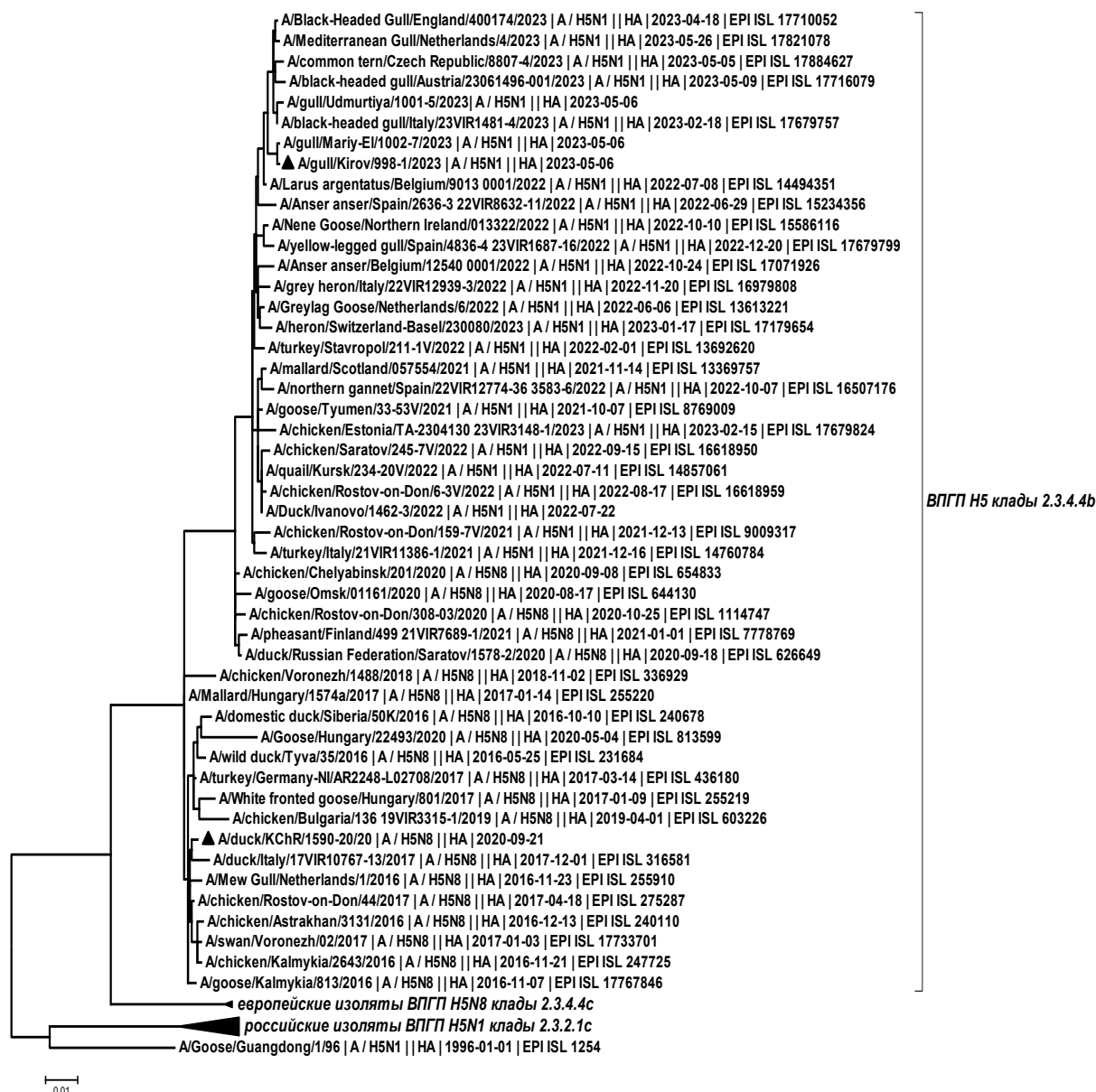


Рис. 1. Филогенетическое дерево ВППП, построенное по полноразмерной последовательности гена HA /
Fig. 1. Phylogenetic tree of HPAI virus constructed based on full-length HA gene sequence

¹⁰Ван дер Ваден Б. Л. Математическая статистика. М.: изд-во иностранной литературы, 1960. 434 с.

URL: <https://libcats.org/book/405713>

¹¹Урбах В. Ю. Статистический анализ в биологических и медицинских исследованиях. М.: Медицина; 1975. 297 с. URL: <https://reallib.org/reader?file=1213098>

¹²Фёрстер Э., Рёни Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа. М.: Финансы и статистика, 1983. 304 с. URL: <https://djvu.online/file/ZebZGmmgEErGN>

Таблица – Показатели иммунологического действия образцов инактивированных вакцин против ГП на основе антигенов НППГ и ВППГ вируса H5N1 /

Table – Indicators of immunological effect of the inactivated anti-AI vaccine specimens based on LPAI antigens and H5N1 HPAI virus

Оценки показателей соответственно испытанным антигенам и дозам / Vaccine immunological effect indicators given in accordance with tested antigens and concentrations				
Антиген / Antigen	доза антигена / antigen concentration	титр в РТГА / HI titre	клинический показатель / clinical score	протективный индекс / protective index
	*D (lg D)	**log ₂ T	***($\sum c$)/n	PI = 1 - ($\sum c$)/n
НППГ / LPAIV	1 (0,00)	6,67	0/17	1,0
	1:25 (1,40)	5,33	1/10	0,9
	1:50 (1,70)	4,33	4/10	0,6
	1:100 (2,00)	2,00	6/10	0,4
ВППГ / HPAIV	1 (0,00)	6,33	0/10	1,0
	1:25 (1,40)	5,00	3/10	0,7
	1:50 (1,70)	2,00	7/10	0,3
	1:100 (2,00)	2,00	7/10	0,3
Контроль / Control		0,47	10/10	0,0

* Величина разведения антигена в прививном объеме; ** средний логарифмический титр антител в группе птиц после вакцинации; *** $\sum c$ – количество клинически больных и погибших птиц после контрольного заражения (накопленный показатель в течение опыта); n – число птиц в группе до заражения /

* Antigen dilution in vaccine inoculation volume; ** mean logarithmic antibody titre in group of chickens after vaccination; *** $\sum c$ – number of clinically diseased and dead chickens after challenge (score accumulated during the test); n – number of chickens in a group before challenge

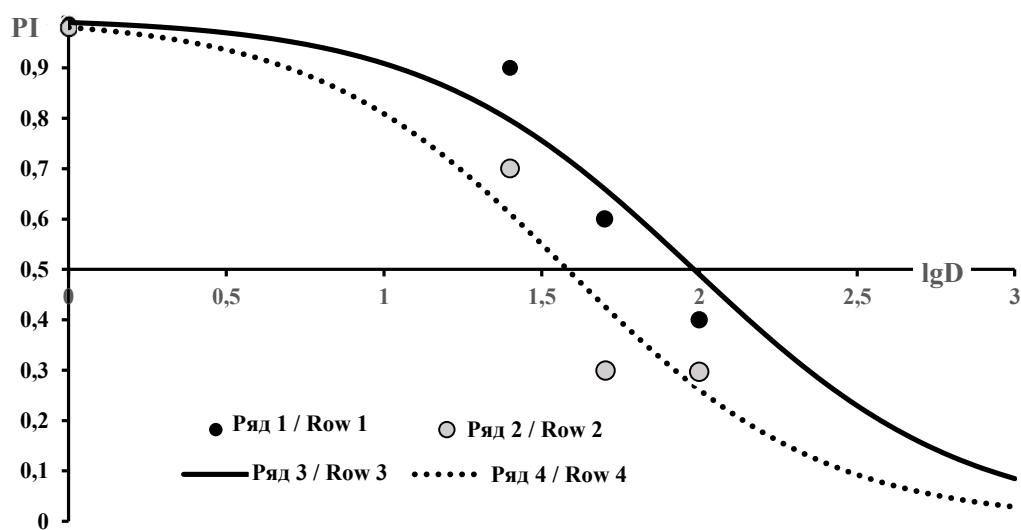


Рис. 2. Зависимость между испытанными дозами (lgD) антигенов НППГ и ВППГ вируса H5N1 и протективными индексами (PI) вакцины «АвиФлуВак» и референтного препарата против вируса ВППГ H5N1. Оси координат: lgD – логарифм величины разведения антигена в составе препарата; PI – индекс защиты (доля вакцинированных птиц, защищенных в остром опыте от клинического проявления гриппа). Горизонтальная ось пересекает вертикальную в точке P = 0,5 (50%-ой защиты). Даны экспериментальные оценки индексов защиты после испытания заданных разведений антигенов НППГ (Ряд 1) и ВППГ (Ряд 3). Показаны: линия регрессии 'P' по lgD, где: 'P = 1 - 1/(1 + (antilg 'f)); 'f – прогнозируемый индекс по уравнению 'f = (-1,017)lgD + 2,016 для антигена НППГ (Ряд 2); то же по уравнению 'f = (-1,079)lgD + 1,706 для антигена ВППГ (Ряд 4) /

Fig. 2. The relationship between tested concentrations (lgD) of the LPAIV and H5N1 HPAIV antigens and protective indices (PI) of AviFluVac vaccine and reference vaccine against H5N1 HPAI. Coordinate axes: lgD – logarithm of the antigen dilution contained in the vaccine; PI – protective index (proportion of vaccinated birds protected from clinical AI manifestations after challenge). The horizontal axis intersects the vertical one at the point P = 0.5 (50 % protection). Protective indices experimentally estimated after testing of specified LPAIV antigen dilutions (Row 1) and HPAIV antigen dilutions (Row 3) are given. The following is shown: regression line 'P' according to lgD, where: 'P = 1 - 1/(1 + (antilg 'f)); 'f – predicted index according to the equation 'f = (-1.017)lgD + 2.016 for the LPAIV antigen (Row 2); the same according to the equation 'f = (-1.079)lgD + 1.706 for the HPAIV antigen (Row 4)

Опираясь на принципы, изложенные в книге «Статистическая обработка результатов фармакологических исследований»¹³, по регрессионным уравнениям рассчитали дозы антигенов, обеспечивающих защиту 50 % (PD₅₀) вакцинированных птиц. Установили, что прививной объем неразведенного антигена НППП содержал 2,016/1,017 = (1,982±0,088)lgPD₅₀, аналогичный показатель для препарата ВППП составил 1,706/1,079 = (1,581±0,122)lgPD₅₀. Использовали статистику Стьюдента для числа степеней свободы $f = 30 + 30 - 2 = 58$. Определили, что

по отношению к критериальному показателю неравенство $(1,982 - 1,581)/\sqrt{(0,088^2 + 0,122^2)} = 2,67 \geq t_p = 2,66$ выполняется на уровне $p = 0,01$, т. е. сопоставляемые оценки lgPD₅₀ имеют существенные различия.

Исследование связи протективного эффекта и напряженности поствакцинального гуморального иммунитета. Провели анализ зависимости между величинами log₂T и f, установленными для испытанных прививных доз антигенов. Полученные результаты представлены в виде диаграммы (рис. 3).

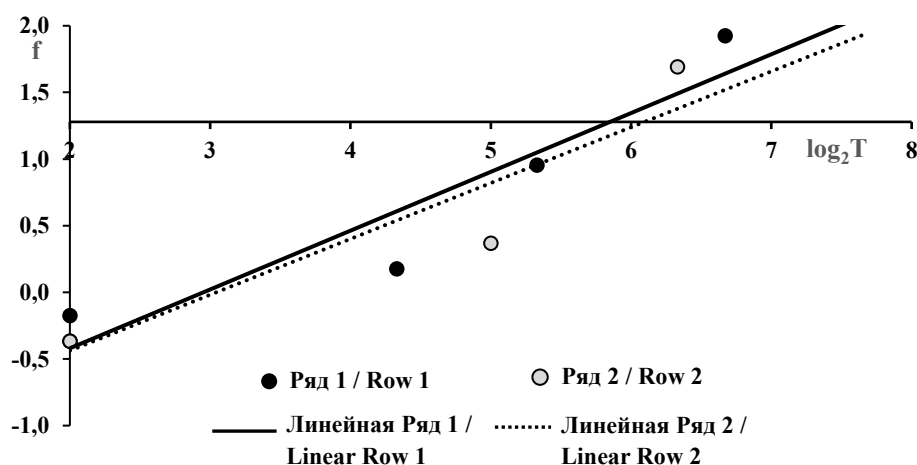


Рис. 3. Зависимость между величиной титра антител к вирусу гриппа (log₂T) и эквивалентом индекса защиты птиц (f). Оси координат: log₂T – логарифм величины титра антител; f – эквивалент индекса защиты, где: $f = \lg(\text{PI}/(1 - \text{PI}))$; PI – индекс защиты (доля вакцинированных птиц, защищенных в остром опыте от клинического проявления гриппа). Горизонтальная ось пересекает вертикальную в точке $f = 1,279$, соответствующей PI = 0,95 (95% защиты). Даны экспериментальные оценки индексов защиты после испытания заданных разведений антигенов НППП (Ряд 1) и ВППП (Ряд 2). Показаны: линия регрессии f по log₂T, где: 'f – индекс, прогнозируемый по уравнению $f = (0,441)\log_2T + 1,302$, имеющего оценку адекватности $R^2 = 0,871$ для антигена НППП (Ряд 1); то же по уравнению $f = (0,419)\log_2T + 1,275$, имеющего оценку адекватности $R^2 = 0,890$ для антигена ВППП (Ряд 2) /

Fig. 3. The relationship between anti-AI antibody titer (log₂T) and equivalent of chicken protection index (f). Coordinate axes: log₂T – logarithm of the antibody titer; f - equivalent of the protection index, where: $f = \lg(\text{PI}/(1 - \text{PI}))$; PI - protective index (proportion of vaccinated birds protected from AI clinical manifestation after challenge). The horizontal axis intersects the vertical one at the point $f = 1,279$, corresponding to PI = 0,95 (95% protection). Protection indices experimentally estimated after testing of specified LPAIV antigen (Row 1) and HPAIV antigen (Row 3) dilutions are given. Regression line f according to log₂T, where: 'f is the index predicted by the equation $f = (0,441)\log_2T + 1,302$, having an adequacy score $R^2 = 0,871$ for the LPAIV antigen (Row 1); the same according to the equation $f = (0,419)\log_2T + 1,275$, having an adequacy score $R^2 = 0,890$ for HPAIV antigen (Row 2)

Из данных рисунка 3 следует, что регрессионные модели, построенные для исследуемых вакцин, имели удовлетворительные коэффициенты адекватности и были практически идентичны. Полученные уравнения позволили определить ожидаемые титры антител (T₉₅),

которые соответствуют 95 % защиты вакцинированных птиц, или индексу $f = 1,279$. Искомые оценки составили для НППП – величину $\log_2T_{95} = (1,279 + 1,302)/0,441 = 5,853$, или 1:60; для ВППП – величину $\log_2T_{95} = (1,279 + 1,275)/0,419 = 6,095$, или $T_{95} \approx 68$.

¹³Прозоровский В. Б. Статистическая обработка результатов фармакологических исследований. Психофармакология и биологическая наркология. 2007;7(3–4):2090–2120. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11691694> EDN: JVWCBJ

Известно, что вспышки ВППП на птицеводческих предприятиях (например, в США) в большинстве случаев географически совпадают с путями миграции диких водоплавающих птиц¹⁴. Учитывая роль орнитофауны в распространении инфекции ВППП в ряде регионов РФ, штамм A/gull/Kirov/998-1/2023 H5N1 следует считать эпизоотически опасным. На этом основании использование данного штамма в качестве вируса-пробойника для оценки протективного действия вакцин против ВППП является обоснованным.

Концентрация антигена в прививном объеме инаktivированной вакцины является важнейшей характеристикой препарата. Основной антиген вируса (гемагглютинин) может быть измерен в абсолютных единицах, например, в весовых [1] или в единицах действия, например в PD₅₀. Считается, что прививной объем эффективной вакцины против гриппа птиц должен содержать 50 PD₅₀ [2, 4], что соответствует 0,3–7,8 [2], или 3 мкг гемагглютинина [4].

Процедура проведения острого опыта полностью соответствовала общепринятой методике [4]. Как следует из полученных результатов, вакцина «АвиФлуВак» на основе антигена НППП и использованная в качестве референта вакцина на основе антигена ВППП, обеспечили защиту 100% иммунизированных птиц при введении одного прививного объема, что доказывает их эффективность. Однако результаты регрессионного анализа показали, что (с учетом стандартной ошибки) прививной объем препарата «АвиФлуВак» содержал 96 (78 ÷ 117) PD₅₀, а прививной объем референтного препарата – 38 (29 ÷ 51) PD₅₀. Это означало, что антигенный потенциал вакцины «АвиФлуВак» против штамма A/gull/Kirov/998-1/2023 H5N1 более чем в 2,5 раза превосходил контрольный препарат и в 1,9 раза – рекомендуемую концентрацию [4].

Ранее уже была проведена оценка протективных свойств вакцинного препарата из штамма «Ямал» [5], которая показала эффективную защиту против гетерологичного подтипа H5N8 на примере штамма A/duck/KChR/1590-20/2. Вирус A/duck/KChR/1590-20/2 также принадлежит к генетической кладе 2.3.4.4b. Результаты филогенетического анализа, приведенные в данной работе, свидетельствуют об активном антигенном дрейфе вирусов гриппа птиц подтипа H5 на территории Евразии в период 2016–

2023 гг. Изоляты вируса гриппа птиц, против которых была экспериментально показана эффективная защита вакцинными препаратами на основе штамма «Ямал» отмечены на рисунке 1 черным треугольником.

Поскольку защита птиц от генерализованной инфекции вируса гриппа в основном обеспечивается выработкой антител против вирусного гемагглютинина (HA) [6], то данные РТГА являются важными показателями напряженности поствакцинального гуморального иммунитета. Известны титры иммунных сывороток в РТГА, которые свидетельствуют о защите птиц от заболеваемости и смертности – 4 log₂ [4, 7] и титры, предотвращающие в том числе локальную репродукцию вируса – 6,5 log₂ [7]. При этом необходимо, чтобы титр антител более 4 log₂ присутствовал у 80 % птицепоголовья [8]. При выполнении настоящих исследований защита 95 % вакцинированных птиц соответствовала ожидаемым титрам 5,9 и 6,1 log₂ для вакцины «АвиФлуВак» и контрольного препарата, соответственно. Эти оценки статистически не различимы между собой и удовлетворительно согласуются с вышеприведенными данными.

Заключение. Результаты проведенных исследований позволили сделать следующие выводы:

- выделенный из патологического материала, полученного в очаге заболевания на территории РФ, вирус определен как штамм ВППП A/gull/Kirov/998-1/2023 H5N1, который принадлежит к азиатской генетической линии вируса ВППП подтипа H5, кладе 2.3.4.4b. Штамм охарактеризован как эпизоотически опасный для РФ;

- установлено, что инаktivированная эмульсионная вакцина «АвиФлуВак» обладает протективным эффектом против штамма ВППП A/gull/Kirov/998-1/2023 H5N1 и на 28-е сутки после иммунизации полностью предотвращает клиническое проявление болезни при заражении вакцинированных птиц. Протективный потенциал вакцины составил 96 PD₅₀ в одном прививном объеме;

- показано, что вакцина «АвиФлуВак» на 28-е сутки после применения индуцирует у птиц напряженный гуморальный иммунитет против гриппа. Поствакцинальный титр антител к вирусу гриппа в РТГА, соответствующий защите 95 % привитых птиц, составил прогнозируемую величину 5,9 log₂ (или ≈ 1:60).

¹⁴Маилян Э. С. Грипп птиц. Новый взгляд на прошлое, настоящее и будущее птицеводства. НПК Фарминдустрия. URL: <https://pharmindustria.com/projects/poleznye-stati-po-veterinari/gripp-ptits-novyy-vzglyad-na-proshloe-nastoyashchee-ptizevodstva/>

References

1. Peyre M., Fusheng G., Desvaux S., Roger F. Avian influenza vaccines: a practical review in relation to their application in the field with a focus on the Asian experience. *Epidemiology & Infection*. 2009;137(1);1–21.
DOI: <https://doi.org/10.1017/S0950268808001039>
2. Swayne D. E. Laboratory methods for assessing and licensing influenza vaccines for poultry. In: Spackman E. (eds) *Animal Influenza Virus. Methods in Molecular Biology*. Humana, New York, NY, 2020. Vol. 2123. pp. 211–225.
DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0346-8_16
3. Lee Y. J., Sung H. W., Choi J. G., Lee E. K., Jeong O. M., Kwon Y. K., et al. Effects of homologous and heterologous neuraminidase vaccines in chickens against H5N1 highly pathogenic avian influenza. *Avian Diseases*. 2007;51(s1):476–478.
DOI: <https://doi.org/10.1637/7548-033106R.1>
4. Avian influenza (including infection with high pathogenicity avian influenza viruses). OIE. *Terrestrial Animal Health* 2021. Chapter 3.3.4., pp. 1–24. URL: https://www.woah.org/fileadmin/Home/fr/Health_standards/tahm/3.03.04_AI.pdf
5. Фролов С. В., Чвала И. А., Мороз Н. В., Кулаков В. Ю., Сосипаторова В. Ю., Андрейчук Д. Б. Иммунобиологические свойства инактивированных вакцин против высокопатогенного гриппа птиц, изготовленных на основе антигенов штаммов вируса гриппа подтипа А/Н5N1 различной вирулентности. *Ветеринария сегодня*. 2022;11(4):367–374.
DOI: <https://doi.org/10.29326/2304-196X-2022-11-4-367-374> EDN: RAVLZB
6. Frolov S. V., Chvala I. A., Moroz N. V., Kulakov V. Yu., Sosipatorova V. Yu., Andreychuk D. B. Immunobiological properties of inactivated anti-highly pathogenic avian influenza vaccines based on antigens of A/H5N1 avian influenza virus strains of different virulence. *Veterinariya segodnya = Veterinary Science Today*. 2022;11(4):367–374. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.29326/2304-196X-2022-11-4-367-374>
6. Katz J. M., Lu X., Frace A. M., Morken T., Zaki S. R., Tumpey T. M. Pathogenesis of and immunity to avian influenza A H5 viruses. *Biomedicine & Pharmacotherapy* 2000;54(4):178–187. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0753-3322\(00\)89024-1](https://doi.org/10.1016/S0753-3322(00)89024-1)
7. Kumar M., Chu H.-J., Rodenberg J., Krauss S., Webster R. G. Association of serologic and protective responses of avian influenza vaccines in chickens. *Avian Diseases* 2007;51(s1):481–483. DOI: <https://doi.org/10.1637/7605-041706R1.1>
8. Джавадов Э. Д., Дмитриева М. Е. Грипп птиц. СПб: ГНУ ВНИВИП Россельхозакадемии, 2011. 187 с.
Dzhavadov E. D., Dmitrieva M. E. Avian flu. Saint-Petersburg: *GNU VNIVIP Rossel'khozakademii*, 2011. 187 p.

Сведения об авторах

Мороз Наталья Владимировна, кандидат вет. наук, зав. лабораторией профилактики болезней птиц, ФГБУ «Федеральный центр охраны здоровья животных» (ФГБУ «ВНИИЗЖ»), мкр. Юрьево, г. Владимир, Владимирская область, Российская Федерация, 600901, e-mail: arriah@fsvps.gov.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9672-8594>

Долгов Дмитрий Львович, заведующий сектором инактивированных вакцин лабораторией профилактики болезней птиц, ФГБУ «Федеральный центр охраны здоровья животных» (ФГБУ «ВНИИЗЖ»), мкр. Юрьево, г. Владимир, Владимирская область, Российская Федерация, 600901, e-mail: arriah@fsvps.gov.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6802-9940>

Чвала Илья Александрович, кандидат вет. наук, заместитель директора по НИР, ФГБУ «Федеральный центр охраны здоровья животных» (ФГБУ «ВНИИЗЖ»), мкр. Юрьево, г. Владимир, Владимирская область, Российская Федерация, 600901, e-mail: arriah@fsvps.gov.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1659-3256>

✉ **Фролов Сергей Владимирович**, кандидат вет. наук, начальник отдела профилактики болезней птиц, ФГБУ «Федеральный центр охраны здоровья животных» (ФГБУ «ВНИИЗЖ»), мкр. Юрьево, г. Владимир, Владимирская область, Российская Федерация, 600901, e-mail: arriah@fsvps.gov.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6802-9940>, e-mail: frolov@arriah.ru

Грехнева Алёна Дмитриевна, аспирант референтной лаборатории вирусных болезней птиц, ФГБУ «Федеральный центр охраны здоровья животных» (ФГБУ «ВНИИЗЖ»), мкр. Юрьево, г. Владимир, Владимирская область, Российская Федерация, 600901, e-mail: arriah@fsvps.gov.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6119-0202>

Кулаков Владимир Юрьевич, кандидат вет. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории профилактики болезней птиц, ФГБУ «Федеральный центр охраны здоровья животных» (ФГБУ «ВНИИЗЖ»), мкр. Юрьево, г. Владимир, Владимирская область, Российская Федерация, 600901, e-mail: arriah@fsvps.gov.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1898-4576>

Information about the authors

Natalya V. Moroz, PhD in Veterinary, Head of the Laboratory for Avian Disease Prevention, Federal Centre for Animal Health (FGBI «ARRIAH»), mcr. Yur'vetes, Vladimir, Vladimir region, Russian Federation, 600901, e-mail: arriah@fsvps.gov.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9672-8594>

Dmitry L. Dolgov, PhD in Veterinary, Head of the Unit for Inactivated Vaccines, the Laboratory for Avian Disease Prevention, Federal Centre for Animal Health (FGBI «ARRIAH»), mcr. Yur'vetes, Vladimir, Vladimir region, Russian Federation, 600901, e-mail: arriah@fsvps.gov.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6802-9940>

Ilya A. Chvala, PhD in Veterinary, Deputy Director for Research, Federal Centre for Animal Health (FGBI «ARRIAH»), mcr. Yur'vetes, Vladimir, Vladimir region, Russian Federation, 600901, e-mail: arriah@fsvps.gov.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1659-3256>

✉ **Sergey V. Frolov**, PhD in Veterinary, Head of the Unit for Avian Disease Prevention, the Laboratory for Avian Disease Prevention, Federal Centre for Animal Health (FGBI «ARRIAH»), mcr. Yur'vetes, Vladimir, Vladimir region, Russian Federation, 600901, e-mail: arriah@fsvps.gov.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6802-9940>, e-mail: frolov@arriah.ru

Alyona D. Grekhneva, Postgraduate, Reference Laboratory for Viral Avian Diseases, Federal Centre for Animal Health (FGBI «ARRIAH»), mcr. Yur'vetes, Vladimir, Vladimir region, Russian Federation, 600901, e-mail: arriah@fsvps.gov.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6119-0202>

Vladimir Yu. Kulakov, PhD in Veterinary, leading researcher, the Laboratory for Avian Disease Prevention, Federal Centre for Animal Health (FGBI «ARRIAH»), mcr. Yur'vetes, Vladimir, Vladimir region, Russian Federation, 600901, e-mail: arriah@fsvps.gov.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1898-4576>

✉ – Для контактов / Corresponding author

МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ / MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.184-195>

УДК 635.1+62-5



Разработка роботизированного буртоукладчика с цифровой системой автоматизированного движения для закладки на хранение картофеля и овощных культур

© 2025. А. С. Дорохов, А. В. Сибирёв✉, М. А. Мосяков, Н. В. Сазонов, А. В. Грищенко

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»,
г. Москва, Российская Федерация

Автоматизация процесса закладки картофеля и овощных культур на хранение является значимым фактором увеличения производительности производства. В статье выполнено теоретическое моделирование функциональных параметров роботизированного буртоукладчика. На основании полученных моделей разработан роботизированный буртоукладчик с цифровой системой автоматизированного движения, разработку которой выполняли с использованием методов классической и земледельческой механики, систем автоматизированного проектирования с пакетами прикладных программ Solidworks и «Компас». Для снижения контактного напряжения клубня картофеля при его сходе с поверхности транспортной ленты роботизированного буртоукладчика необходимо предусмотреть наличие устройства для гашения энергии падения клубней на поверхность хранилища. Выполнено теоретическое моделирование гасителя энергии при закладке на хранение картофеля. Рабочая поверхность гасителя колебаний выполнена из резиотехнического материала и представляет собой нелинейную упругую поверхность, имеющую возможность восстанавливаться после деформации. Для рабочего состояния взаимодействия клубня картофеля с гасителем энергии падения максимальное контактное напряжение во время процесса падения клубня составляет 0,107 МПа, а смещение при падении – 33 мм. Для проверки разработанных алгоритмов функционирования цифровой системы автоматизированного движения роботизированного комплекса машин для закладки на хранение картофеля и овощных культур проведены экспериментальные исследования по выполнению технологического процесса движения по хранилищу с определением основных показателей оценки качества и работоспособности машины. Определены результаты оценки обнаружения клубней картофеля в хранилище для развернутой модели искусственной нейронной сети: точности ($T = 93,9\%$), достоверности ($P = 98,2\%$), уровня полноты ($\Pi = 94,8\%$) и оценки ($F1 = 96,5\%$), а также зависимости обнаружения клубней картофеля в хранилище при точности заглубления, точности построения траектории движения машины при естественном и искусственном освещении.

Ключевые слова: технологическая платформа, исходные требования, моделирование, эксперимент, энергия падения

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (тема № FGUN-2022-0003).

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

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Дорохов А. С., Сибирёв А. В., Мосяков М. А., Сазонов Н. В., Грищенко А. В. Разработка роботизированного буртоукладчика с цифровой системой автоматизированного движения для закладки на хранение картофеля и овощных культур. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(1):184–195.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.184-195>

Поступила: 19.09.2024

Принята к публикации: 28.01.2025

Опубликована онлайн: 26.02.2025

Development of a digital system for automated movement of a pick-up conveyor for storing potatoes and vegetable crops

© 2025. Aleksey S. Dorokhov, Aleksey V. Sibirev✉, Maksim A. Mosyakov, Nikolai V. Sazonov, Alexander V. Grishchenko

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Automation of the process of laying potatoes and vegetable crops for storage is a significant factor in increasing production productivity. The article presents theoretical modeling of the functional parameters of a robotic clamp stacker. Based on the obtained models, a robotic clamp stacker with a digital automated motion system was developed, the development of which was carried out using the methods of classical and agricultural mechanics, automated design systems with the Solidworks and

"Compass" application software packages. To reduce the contact stress of a potato tuber when it comes off the surface of the conveyor belt of a robotic clamp stacker, it is necessary to provide a device for damping the energy of the tubers falling onto the storage surface. Theoretical modeling of the energy damper when laying potatoes for storage was performed. The working surface of the vibration damper is made of rubber material and is a nonlinear elastic surface that can be restored after deformation. For the working state of the interaction of the potato tuber with the fall energy absorber, the maximum contact stress during the tuber fall is 0.107 MPa, and the displacement during the fall is 33 mm. To test the developed algorithms for the functioning of the digital system of automated movement of the robotic complex of machines for laying potatoes and vegetable crops for storage, experimental studies were conducted on the implementation of the technological process of movement along the storage facility with the definition of the main indicators of the quality and operability of the machine. The results of the potato tuber detection assessment in the storage facility for the expanded model of the artificial neural network were determined: accuracy ($T = 93.9\%$), reliability ($P = 98.2\%$), completeness level ($P = 94.8\%$) and assessment ($F1 = 96.5\%$), as well as the dependence of potato tuber detection in the storage facility on the accuracy of deepening, the accuracy of constructing the machine movement trajectory under natural and artificial lighting.

Keywords: technological platform, initial requirements, modeling, experiment, fall energy

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (theme No. FGUN-2022-0003).

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: Dorokhov A. S., Sibirev A. V., Mosyakov M. A., Sazonov N. V., Grishchenko A. V. Development of a digital system for automated movement of a pick-up conveyor for storing potatoes and vegetable crops. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):184–195. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.184-195>

Received: 19.09.2024

Accepted for publication: 28.01.2025

Published online: 26.02.2025

Одним из сдерживающих факторов более интенсивного увеличения объема валового сбора картофеля и овощных культур, а также площадей их возделывания являются морально устаревшие технологии системы сепарации и сортирования при послеуборочной обработке, которые не соответствуют современным требованиям к продукции при закладке на хранение. Это обусловлено тем, что послеуборочное сортирование вороха в основном является механическим. Данный способ приводит к травмированию картофеля и овощных культур рабочими органами машин для закладки на хранение, что снижает качество продукции и приводит к значительным потерям ее при хранении.

Процессы сепарации, сортирования и последующей закладки на хранение – основополагающие требования агротехнологии выращивания овощных культур и картофеля, которые являются одними из наиболее энергоемких [1, 2, 3].

Современные стандарты требуют, чтобы сельскохозяйственная продукция соответствовала определенным параметрам, таким как размер, цвет и качество. Для соблюдения данных стандартов и обеспечения качества продукции требуется разработка неинвазивных высокопроизводительных методов распознавания и классификации повреждений картофеля и овощных культур [4], выявления поражений их болезнями при сортировании в режиме реального времени при закладке на хранение [5]

с высоким уровнем автоматизации комплекса машин, выполняющих эти операции.

Автоматизация процесса конвейерной транспортировки овощных культур является значимым фактором увеличения производительности производства и включает автоматизацию отдельных конвейеров на определенных участках и линий в целом. В настоящее время предприятиями отечественного сельскохозяйственного машиностроения выпускаются комплексы машин для закладки на хранение овощных культур с частичной системой автоматизацией отдельных операций [4].

В частности, компанией ООО «Агро-техмаш» выпускается машина (рис. 1), обеспечивающая механизированную закладку в хранилище овощной продукции при использовании в конструкции машины электрического привода основных рабочих элементов, которыми управляет оператор. Недостатком конструкции данной машины является невозможность проведения технологической операции без использования оператора, от квалификации которого зависит качество выполнения операции закладки на хранение.

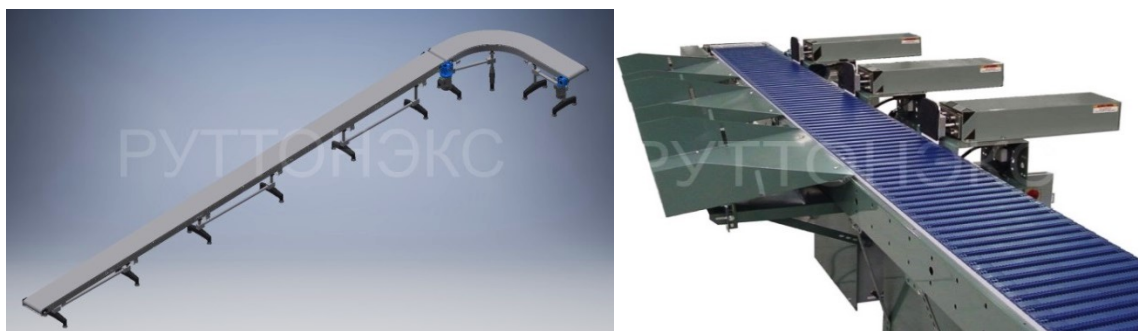
Известна система автоматизации конвейерной транспортировки овощных культур и картофеля (рис. 2) производства «Рутронэкс» (Россия), которая предназначена для перевода конвейерной линии в режим выполнения производственных задач без участия людей (или для его снижения до минимума) [4].

Технические средства для автоматизации процесса конвейерной транспортировки имеют широкую гамму, обладают большим функционалом и предназначены для выполнения ряда задач: изменение траектории движения продукции; скоростная сортировка продукции; автоматизированная отбраковка продукции; скоростной

спуск продукции; измерение параметров продукции в движении; сканирование данных штрих-кодов продукции; автоматизированное накопление и выдача тары; контроль положения грузов на участках движения и накопления; управление средствами автоматизации; безопасность работы оборудования [5].



*Рис. 1. Транспортер-подборщик корнеплодов овощных культур и картофеля /
Fig. 1. Conveyor-picker of root crops, vegetables and potatoes*



*Рис. 2. Система автоматизации конвейерной транспортировки овощных культур и картофеля /
Fig. 2. Automation system for conveyor transportation of vegetables and potatoes*

Экономический эффект от внедрения автоматизации конвейерного оборудования достигается, в основном, за счет высвобождения обслуживающего персонала [6, 7, 8].

Цель исследования – теоретическое моделирование функциональных параметров, в частности гасителя энергии падения при закладке на хранение картофеля, и разработка роботизированного буртоукладчика с цифровой системой автоматизированного движения.

Научная новизна – закономерности моделирования и управления адаптивной системой автоматизированных рабочих органов машины для закладки на хранение картофеля и овощных культур.

Материал и методы. Теоретические и экспериментальные исследования проводили

в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (г. Москва), а также в производственных условиях ИСА-филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (Рязанская область) в 2022–2024 гг.

Программой предусматривалось проведение исследований по разработке цифровой системы движения роботизированного буртоукладчика для закладки на хранение картофеля и овощных культур, которые выполняли с использованием методов классической и земледельческой механики, систем автоматизированного проектирования с пакетами прикладных программ Solidworks и «Компас». Полученные результаты экспериментальных исследований обрабатывали методом математической статистики с помощью ЭВМ^{1, 2}.

¹Волкова П. А., Шипунов А. Б. Статистическая обработка данных: это должен знать каждый. Издание 3-е, переработанное. М., 2017. 89 с. URL: https://bioclass.ru/wp-content/uploads/2023/12/volkova_shipunov_obrabotka_2.pdf

²Усманов Р. Р. Статистическая обработка данных агрономических исследований в программе «STATISTICA»: учебно-методическое пособие. М.: РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2020. 177 с. URL: <http://elib.timacad.ru/dl/full/umo467.pdf/download/umo467.pdf>

Результаты и их обсуждение. Изменение функциональных параметров роботизированного буртоукладчика при варьировании вида корнеплодов или картофеля, закладываемых на хранение, можно представить как систему с конечным множеством состояний N , переходы в которой возможны в любой момент времени (в любом участке хранилища). Значение N определяется количеством типов корнеплодов в данном хранилище и выбирается согласно технико-экономическому критерию. Процесс перехода функциональных параметров роботизированного буртоукладчика при варьировании вида корнеплодов можно рассматривать как разрывный марковский процесс со счетным числом состояний, т. е. процесс $x(t)$ с N дискретными состояниями и непрерывным временем t .

После предварительной обработки полученной информации поступающий в микроконтроллер для идентификации выборки полученных значений через систему технического зрения – вид корнеплода, закладываемого на хранение, геометрия и площадь хранилища – определяем матрицу исследуемых параметров:

$$\|X\| = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{p1} & X_{p2} & \dots & X_{pn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\bar{X}_i = (x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{pi})^T$ – вектор измеренных значений признаков измеряемых параметров реализации инновационной технологии закладки на хранение (вид корнеплодов K , геометрии хранилища P и площади хранилища S).

Каждое исследуемое значение по реализации инновационной технологии закладки на хранение определяется системой взаимодействующих параметров роботизированного буртоукладчика, значения которых выражаются через состояние S_2 – нахождение роботизированного буртоукладчика в зоне режимов и S_1 – нахождение роботизированного буртоукладчика не в зоне описывается p -мерным нормальным распределением [5]:

$$N(X, a_K, \Sigma_K), \quad (2)$$

где a_K – оценка средних значений;
 Σ_K – ковариационная матрица.

Кроме того, необходимо предварительно выполнить настройку этапа обучения при известных состояниях системы S_1 и S_2 по обучающим выборкам объема m , представляющих собой результаты измерения значений признаков

m в момент времени с формированием оценки неизвестных векторов средних $\hat{a}_1$ и $\hat{a}_2$ [5]:

$$\hat{a}_1 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{X}_i^{(1)}; \quad (3)$$

$$\hat{a}_2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{X}_i^{(2)}. \quad (4)$$

Состояние системы S_1 :

$$\|X\|_m^{(1)} = \|\bar{X}_1^{(1)}, \bar{X}_2^{(1)} \dots \bar{X}_m^{(1)}\|. \quad (5)$$

Далее на этапе контроля по измеренным в n моментов времени значениям признаков вида корнеплодов $\bar{X}_1^{(1)}, \bar{X}_2^{(1)} \dots \bar{X}_m^{(1)}$ принимается решение о нахождении роботизированного буртоукладчика в зоне позиционирования его в хранилище.

При статистической идентификации по конечной выборке достаточно применить наиболее простой критерий правдоподобности полученных значений исследуемых параметров роботизированного буртоукладчика [5]:

$$\begin{cases} E(\|X\|) \geq 0, & \text{то } S \in S_2; \\ E(\|X\|) < 0, & \text{то } S \in S_1. \end{cases} \quad (6)$$

Задача оптимизации временных параметров технологического процесса работы роботизированного буртоукладчика формулируется как задача минимизации суммарного объема выполненных работ, а именно величины загрузки в хранилище картофеля и овощных культур:

$$\rho = \rho(2m + n), \quad (7)$$

где m – результаты измерения значений признаков n в момент времени с формированием оценки неизвестных векторов средних значений параметра.

Для достижения заданного уровня достоверности выполнения операции роботизированной загрузки хранилища при требуемой величине ограничения площади хранилища необходимо обеспечить проведение большого объема выборок экспериментальных данных как по занимаемой площади хранилища, так и по видам закладываемой на хранение товарной продукции [6, 7, 8].

Для снижения контактного напряжения клубня картофеля при его сходе с поверхности транспортной ленты роботизированного буртоукладчика в конструкции необходимо предусмотреть наличие устройства для гашения энергии падения клубней на поверхность хранилища (рис. 3).

Схема взаимодействия клубня картофеля с гасителем энергии падения представлена на рисунке 4.

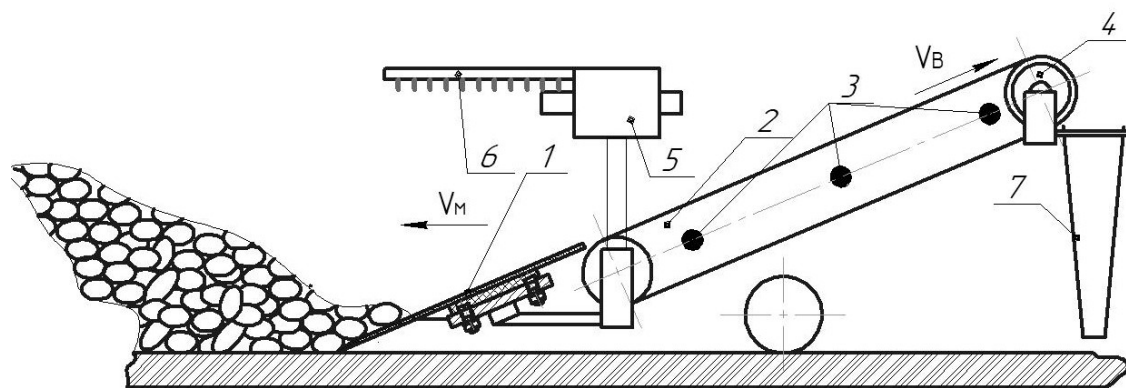


Рис. 3. Схема технологического процесса работы роботизированного буртоукладчика для закладки на хранение картофеля и овощных культур: 1 – питатель подпорный; 2 – транспортер выгрузной; 3 – источник ультрафиолетового излучения; 4 – ролик обводной; 5 – видеокамера; 6 – источник лазерный (диод); 7 – устройство для гашения энергии падения клубней /

Fig. 3. Scheme of the technological process of operation of the robotic complex of machines for laying potatoes and vegetable crops for storage: 1 – supporting feeder; 2 – unloading conveyor; 3 – ultraviolet radiation source; 4 – bypass roller; 5 – video camera; 6 – laser source (diode); 7 – device for damping the energy of falling tubers

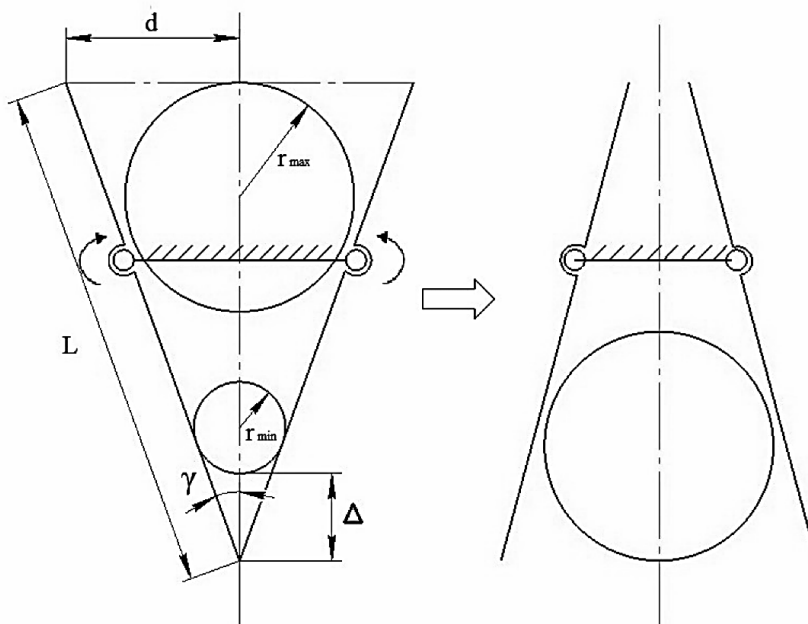


Рис. 4. Схема взаимодействия клубня картофеля с гасителем энергии падения /
Fig. 4. Scheme of interaction of potato tuber with fall energy absorber

Из геометрической зависимости, представленной на рисунке 4 определим: параметры угла вершины конуса γ гасителя энергии падения клубней, град; Δ – расстояние защемления клубня картофеля у основания конуса, м; d – расстояние от основания гасителя колебаний до центра клубня, м; L – длину образующей гасителя энергии падения клубней, м:

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{r_{\min}}{\Delta + r_{\min}}\right); \quad (8)$$

$$d = \frac{r_{\max}}{\operatorname{tg}[(90^\circ - \gamma)]/2}; \quad (9)$$

$$L = \frac{r_{\max} / \operatorname{tg}[(90^\circ - \gamma)]/2}{\sin \gamma}, \quad (10)$$

где $r_{\min}$ и $r_{\max}$ – минимальный и максимальный диаметры клубня картофеля, м.

Величину Δ определяли проведением имитационного эксперимента, т. е. если $\Delta = 50$ мм, то согласно уравнениям (8)–(10), получим $\gamma = 19^\circ$, $d = 59,5$ мм; $L = 183,5$ мм.

Рабочая поверхность гасителя колебаний выполнена из резинотехнического материала и представляет собой нелинейную упругую поверхность, имеющую возможность восстанавливаться после деформации [9].

Функция упругой потенциальной энергии, описывающая определяющее соотношение нелинейной упругой поверхности [10, 11], имеющей возможность восстанавливаться после деформации, дописывается моделью Муни-Ривлина в форме двух параметров [3]:

$$W = C_{01}(I_1 - 3) + C_{10}(I_2 - 3), \quad (11)$$

где I_i – i -й инвариант тензора деформации Грина; C_{ij} – параметры материала модели резинотехнического материала.

Уравнение гиперэластичного резинового материала можно выразить как тензор напряжений Кирхгофа второго рода S и тензор деформации Коши-Грина E [5]:

$$\begin{cases} S = \frac{\partial W}{\partial E}, \\ S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} = \frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial E_{ij}} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial E_{ij}} + \frac{\partial W}{\partial I_3} \frac{\partial I_3}{\partial E_{ij}}. \end{cases} \quad (12)$$

Согласно выражениям (11) и (12) и в сочетании с соответствующей нелинейной теорией сплошной среды, можно сделать вывод о том, что функциональная связь между инженерным напряжением и инженерной деформацией при одноосном растяжении определяется выражением [5]:

$$\nu = 2[(1 + \varepsilon) - (1 + \varepsilon)^{-2}][C_{01} + (1 + \varepsilon)^{-1}C_{10}], \quad (13)$$

где ε – степень деформации материала гасителя энергии падения.

Вышепредставленное уравнение описывает конститутивную модель каучука Муни-Ривлина. Параметры этой модели можно определить при сопоставлении данных испытаний резинового материала на одноосное растяжение с использованием уравнения (13).

При проектировании роботизированного буртоукладчика для загрузки овощных культур и картофеля плотность материала рабочей поверхности полотна транспортера, изготовленного из силиконового каучука, составляет $1,4 \text{ г см}^3$, а параметры модели, определенные по данным испытаний силиконового каучука на одноосное растяжение, составляют:

$$C_{01} = -42,08, \quad C_{10} = 56,97 \text{ МПа}. \quad (14)$$

Для облегчения решения моделирования взаимодействия клубня картофеля с устройством гашения энергии падения клубней модель данного взаимодействия была упрощена – опорный стержень удален, оставлены только сетка и рама (рис. 5).

Для рабочего состояния взаимодействия клубня картофеля с гасителем энергии падения, представленного на рисунке 6, максимальное контактное напряжение во время процесса падения клубня составляет $0,107 \text{ МПа}$, а смещение при падении – 33 мм .

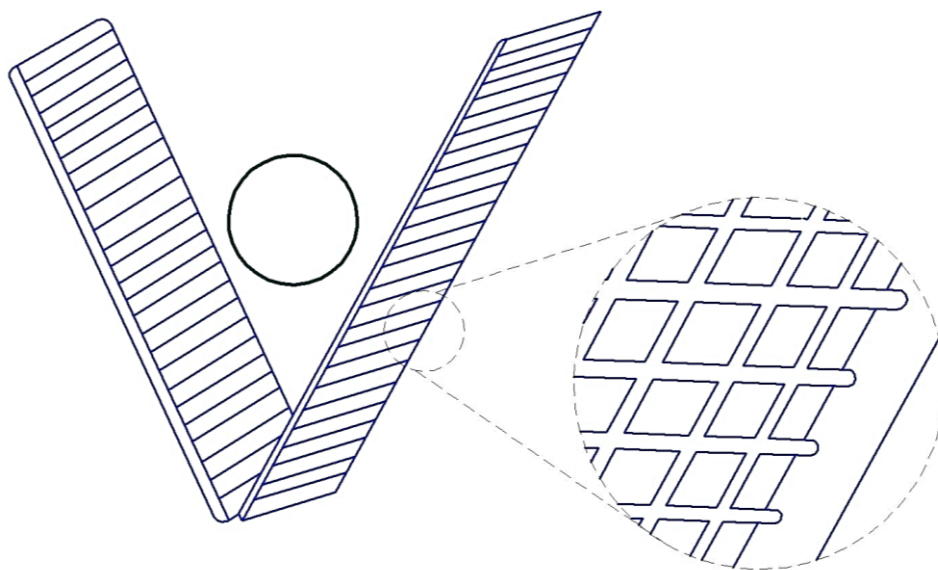


Рис. 5. Моделирование взаимодействия клубня картофеля с гасителем энергии падения /
Fig. 5. Modeling the interaction of potato tuber with a fall energy absorber

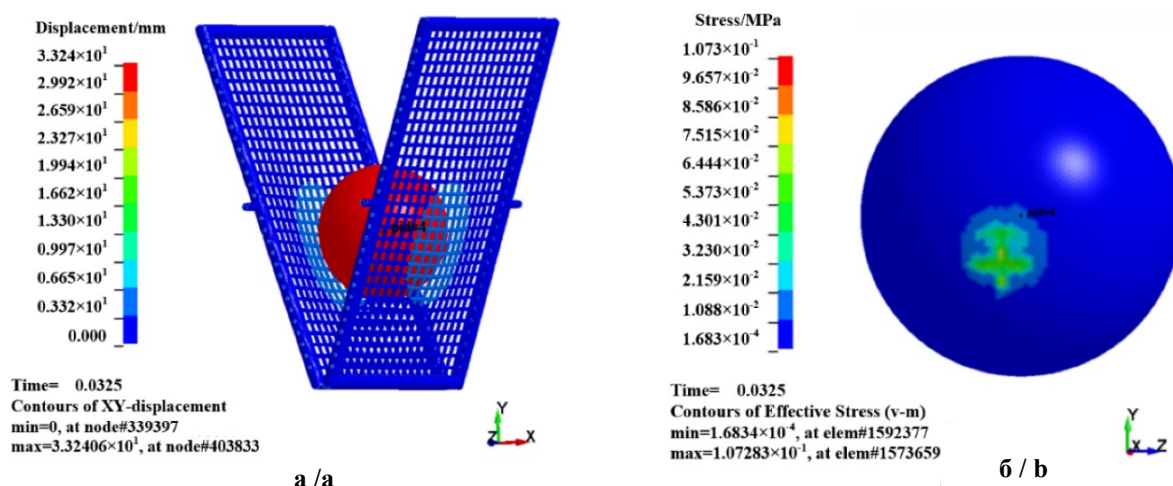


Рис. 6. Результаты моделирования взаимодействия клубня картофеля с гасителем энергии падения: а – смещение клубня картофеля; б – максимальная нагрузка на клубень картофеля /

Fig. 6. Results of modeling the interaction of a potato tuber with a fall energy absorber: a – displacement of the potato tuber; b – maximum load on the potato tuber

Поскольку пиковое контактное напряжение было меньше напряжения повреждения ткани кожуры клубня картофеля на 0,122 МПа, поэтому кожура клубня картофеля не может быть повреждена, т. к. конструкция гасителя энергии падения клубня способствует снижению повреждений.

Когда клубень картофеля при моделировании переместили на расстояние 42 мм от нижней границы, скорость снизилась до 0, и он больше не двигался в отрицательном направлении оси у.

Клубень картофеля не столкнулся с нижней границей, что указывает на то, что запас Δ для предотвращения столкновений 50 мм в формулах (8)-(10) соответствует ограничениям, что обеспечивает основу для расчета размерного параметра механизма гасителя энергии падения.

Данные результаты исследований позволили разработать цифровую систему автоматизированного движения роботизированного буртоукладчика, состоящего из основных аппаратно-программных средств: микроконтроллера 1 ArduinoUNO, блока управления 2; системы технического зрения, состоящей из камеры OrbbecAstraProPlus 3, размещенной на фокусном расстоянии 4, одноплатного компьютера 5 NvidiaJetson, обеспечивающего обработку изображения и генерацию управляющих сигналов для драйверов 6 электропривода ведущих колес и системы лазерных светодиодов (рис. 7).

Для обеспечения автоматизированного движения роботизированного буртоукладчика разработан программный код расчета.

С использованием программно-аппаратных средств цифровой системы автоматизированного движения роботизированного буртоукладчика для закладки на хранение картофеля и овощных культур проведены эксперименты по проверке алгоритмов движения машины в лабораторных условиях ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

Для регистрации основных параметров использовали лабораторно-измерительный комплекс, состоящий из блока снятия регистрационных параметров и персонального компьютера [12, 13].

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволили разработать роботизированный буртоукладчик для закладки на хранение картофеля и овощных культур с цифровой системой автоматизированного движения, представленный на рисунке 8.

Для проверки разработанных алгоритмов функционирования цифровой системы автоматизированного движения роботизированного комплекса машин для закладки на хранение картофеля и овощных культур необходимо проведение экспериментальных исследований в производственных условиях выполнения технологического процесса движения по хранилищу с определением основных показателей оценки качества и работоспособности машины [14, 15].

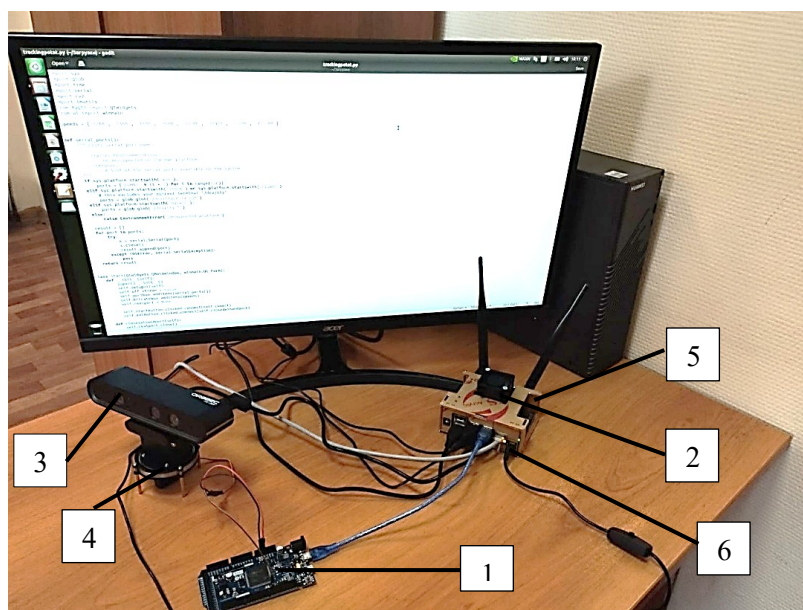


Рис. 7. Программно-аппаратные средства цифровой системы автоматизированного движения роботизированного буртоукладчика: 1 – микроконтроллер ArduinoUNO; 2 – блок управления; 3 – видеочка; 4 – фокус расстояния; 5 – одноплатный компьютер; 6 – драйвер электропривода ведущих колес и системы лазерных светодиодов /

Fig. 7. Hardware and software for a digital system of automated movement of a robotic complex of machines for storage: 1 – microcontroller Arduino UNO; 2 – control unit; 3 – video camera; 4 – distance focus; 5 – single board computer; 6 – driver for electric drive of driving wheels and laser LED system

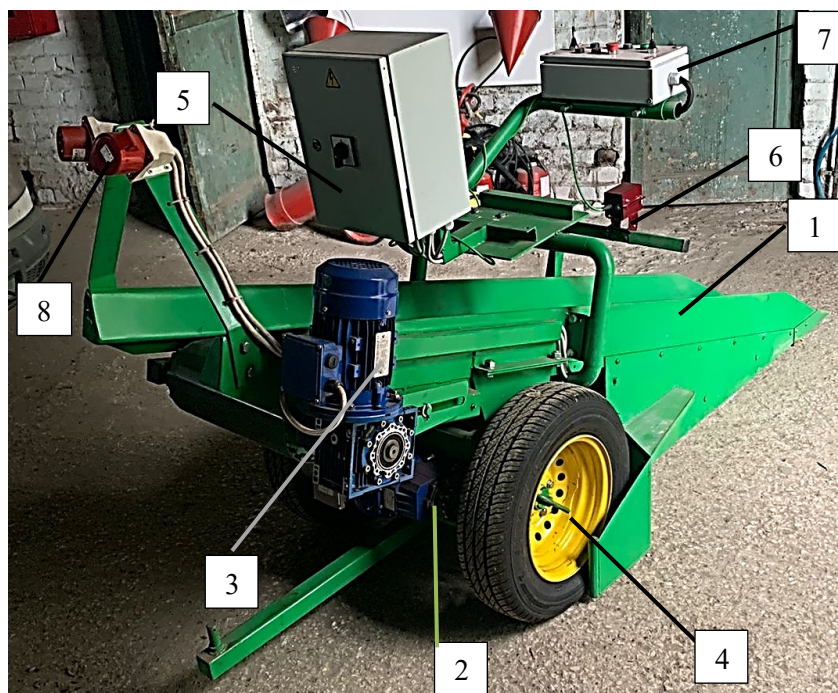


Рис. 8. Общий вид роботизированного буртоукладчика: 1 – транспортер; 2 – конический редуктор привода ротора; 3 – электродвигатель с червячным редуктором; 4 – движитель колесный; 5 – шкаф управления; 6 – система технического зрения; 7 – пульт управления; 8 – система питания /

Fig. 8. General view of the robotic complex of machines for storage: 1 – conveyor; 2 – bevel gear box of the rotor drive; 3 – electric motor with worm gear; 4 – wheel propeller; 5 – control cabinet; 6 – technical vision system; 7 – control panel; 8 – power system

На рисунке 9 представлены результаты экспериментальных исследований роботизированного комплекса машин для закладки на хранение картофеля и овощных культур при

определении точности (Т), достоверности (Р), полноты (П) и оценки (F1) модели обнаружения буртовой поверхности клубней картофеля в хранилище.

Модель показывает уровень достоверности $P = 98,2\%$, точности $T = 93,9\%$, полноты $\Pi = 94,8\%$ и оценки $F1 = 96,5\%$.

$$T = \frac{(I_{\Pi} + I_{OT})}{(I_{\Pi} + I_{OT} + \Phi_{\Pi} + \Phi_{OT})}, \quad (15)$$

где I_{Π} , I_{OT} – истинные положительные и отрицательные значения, %;

Φ_{Π} , Φ_{OT} – ложные положительные и отрицательные значения, %.

$$P = \frac{I_{\Pi}}{I_{OT}} + \Phi_{\Pi}. \quad (16)$$

$$\Pi = \frac{I_{\Pi}}{I_{OT}} + \Phi_{OT}. \quad (17)$$

$$F1 = \frac{2 \times P \times \Pi}{P} + \Pi. \quad (18)$$

На рисунке 10 представлен график потерь модели CNN для заданного выбранного номера эпохи 100.

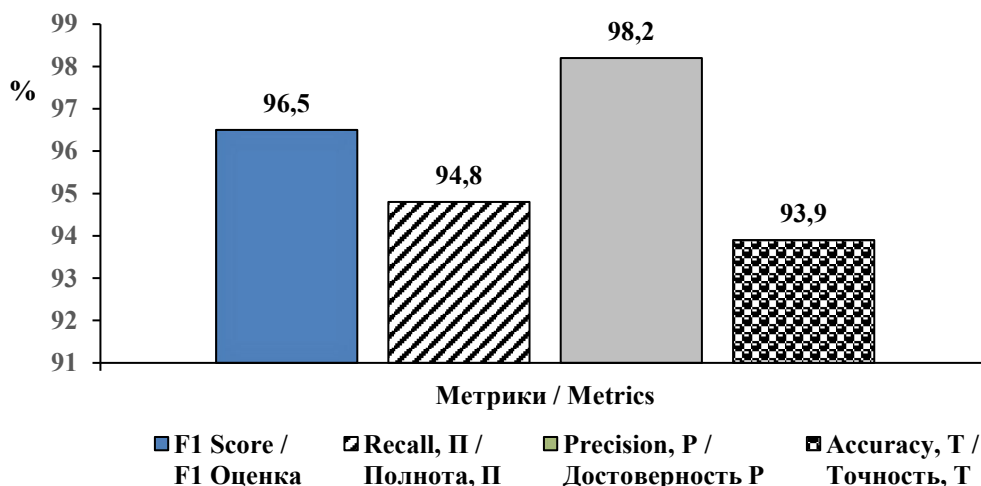


Рис. 9. Результаты оценки обнаружения клубней картофеля в хранилище для развернутой модели искусственной нейронной сети /

Fig. 9. Potato tuber detection evaluation results in storage for the deployed artificial neural network model

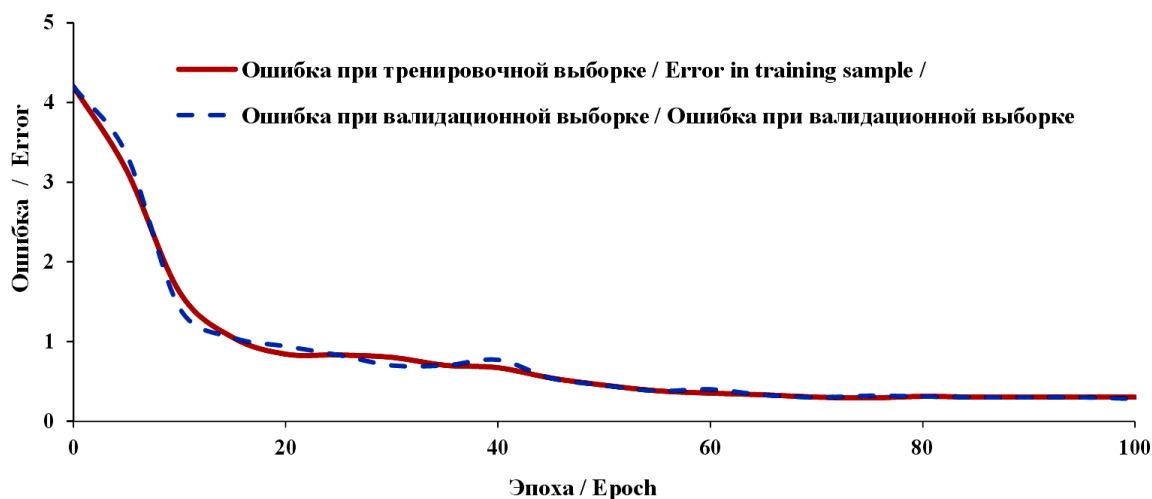


Рис. 10. График зависимости потерь модели CNN для обучающих и тестовых данных от номера эпохи /

Fig. 10. The diagram of dependence of model loss versus epoch number for CNN model on training and test data

На рисунке 11 даны графические зависимости обнаружения клубней картофеля в хранилище, точность заглабления, точность построения траектории движения машины. Кроме того, на рисунке 11 представлено сравнение обнаружения клубней картофеля при разном освещении.

Улучшенная модель CNN, обученная на специально подобранном наборе данных, продемонстрировала существенное улучшение точности обнаружения клубней картофеля в хранилище в динамических условиях. Результаты проведенных экспериментальных исследований подтвердили адаптивность полу-

ченной модели распознавания, улучшив общую точность модели до 93,9 %, а точность распознавания – до 98,2 %.

Синергетическое использование оптимизированного алгоритма планирования траектории машины значительно способствует

повышению общей эффективности процесса роботизированной загрузки картофеля в хранилище за счет снижения времени обнаружения клубней картофеля в хранилище в цикле всей операции по закладке на хранение со средним временем 7,2 с.

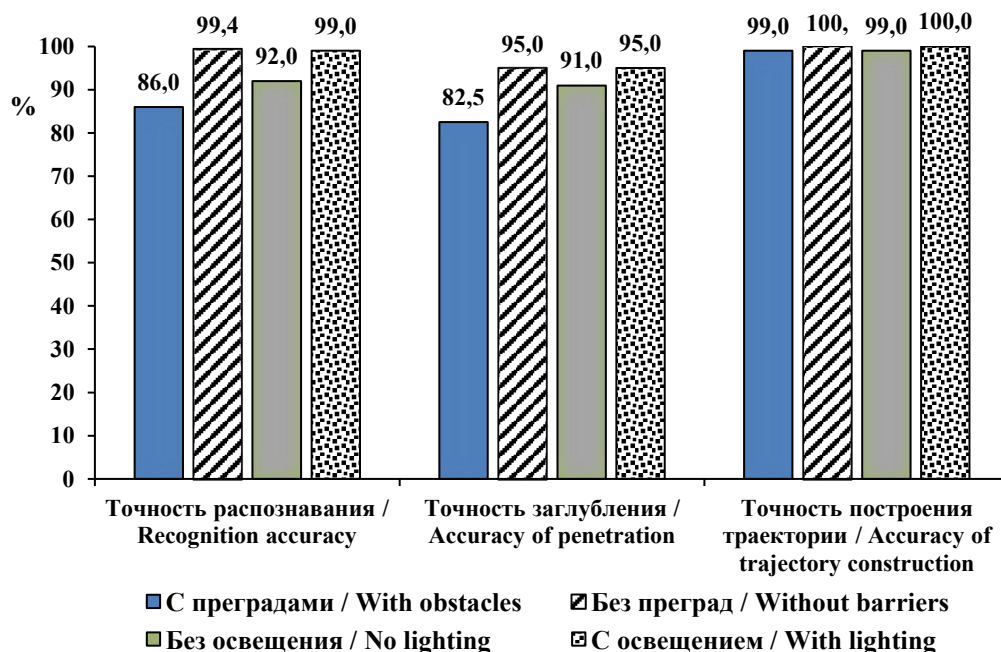


Рис. 11. Показатели эффективности обнаружения клубней картофеля в хранилище с наличием преград и разным освещением /

Fig. 11. Indicators of the efficiency of detection of potato tubers in storage with the presence of obstacles and different lighting

Выводы. Выполнено теоретическое моделирование автоматизированной загрузки картофеля и овощных культур, включающее взаимодействие клубня картофеля с гасителем энергии падения. Результаты моделирования при взаимодействии клубня картофеля с поверхностью транспортной ленты после подачи лопастным питателем свидетельствуют о пиковом контактом напряжении клубня картофеля, составляющим 0,122 МПа, что является очень близким значением предела текучести клубня картофеля, т. е. происходит его повреждение. Максимальное контактное напряжение клубней картофеля, при котором не происходит его повреждение, является значение не более 0,11 МПа.

Для рабочего состояния взаимодействия клубня картофеля с гасителем энергии падения, максимальное контактное напряжение во время процесса падения клубня составляет 0,107 МПа, а смещение при падении – 33 мм. Определено, что пиковое контактное напряжение было меньше напряжения повреждения ткани кожуры клубня картофеля на 0,122 МПа, кожура клубня картофеля не может быть повреждена, и

конструкция гасителя энергии падения клубня способствует снижению повреждений. Данные результаты исследований позволили разработать роботизированный буртоукладчик с цифровой системой автоматизированного движения закладки картофеля на хранение.

Для проверки разработанных алгоритмов функционирования цифровой системы автоматизированного движения роботизированного комплекса машин для закладки на хранение картофеля и овощных культур проведены экспериментальные исследования по выполнению технологического процесса движения по хранилищу с нахождением основных показателей оценки качества и работоспособности машины.

Определены результаты оценки обнаружения клубней картофеля в хранилище для обратной модели искусственной нейронной сети при уровне достоверности точности распознавания 98,2 %, уровне полноты оценки распознавания 94,8 %, а также зависимости обнаружения клубней картофеля в хранилище при точности заглубления, точности построения траектории движения машины при естествен-

ном и искусственном освещении. Результаты проведенных экспериментальных исследований подтвердили адаптивность полученной модели

распознавания, улучшив общую точность модели до 93,9 %, а достоверность оценки распознавания до 98,2 %.

Список литературы

1. Erokhin M. N., Dorokhov A. S., Sibirev A. V., Aksenov A. G., Mosyakov M. A., Sazonov N. V., Godyaeva M. M. Development and Modeling of an Onion Harvester with an Automated Separation System. *AgriEngineering*. 2022;4(2):380–399. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering4020026>
2. Измайлов А. Ю., Колчин Н. Н., Лобачевский Я. П., Кынев Н. Г. Современные технологии и специальная техника для картофелеводства. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015;(3):43–47. Режим доступа: <https://www.vimsmit.com/jour/article/viewFile/67/23> EDN: TTLVUJ
3. Guo H., Lu H., Gao G., Wu t., Chen H., Qiu Z. Design and Test of a Levelling System for a Mobile Safflower Picking Platform. *Applied Sciences*. 2023;13(7):4465. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13074465>
4. Пономарев А. Г., Колчин Н. Н., Зернов В. Н., Петухов С. Н. Селекции и семеноводству картофеля необходима механизация. *Картофель и овощи*. 2017;(3):22–24. Режим доступа: http://potatoveg.ru/wp-content/uploads/2018/04/3_2017.pdf
5. Краснощеков Н. В. Агроинженерная стратегия: от механизации сельского хозяйства к его интеллектуализации. *Тракторы и сельхозмашины*. 2010;(8):5–8. Режим доступа: https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/68902/ru_RU#!
6. Дорохов А. С., Аksenov A. G., Сибирев А. В., Мосяков М. А. Аналитические исследования машинно-технологических комплексов для сорто-фиточистки посадок картофеля и овощных культур в селекции и семеноводстве. *Аграрный научный журнал*. 2022;(4):76–82. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i4pp76-82> EDN: DHXNNI
7. Jahanbakhshi A. Determine some engineering properties of snake melon (*cucumis melo* var. *flexuosus*). *Agricultural Engineering International: The CIGR Journal*. 2018;(20):171–176. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Determine-some-engineering-properties-of-snake-melo-Jahanbakhshi/86e61051046dbacb1057bffe56f90a49f97ef5c>
8. Lehnert C., McCool Ch., Sa I., Perez T. Performance improvements of a sweet pepper harvesting robot in protected cropping environments. *Journal of Field Robotics*. 2020;37(7):1197–1223. DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.21973>
9. Qin Z., Xiaoliang Y. U. E., Bin L. I., Xianping J., Zheng X., Can X. U. Motion planning of picking manipulator based CTB_RRT algorithm. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2021;52(10):129–136. URL: <https://www.nyjxb.net/index.php/journal/article/view/1252>
10. Klose R., Penlington J., Ruckelshausen A. Usability study of 3D time-of-flight cameras for automatic plant phenotyping. *Bornimer Agrartechnische Berichte*. 2009;69:93–105. URL: https://www.researchgate.net/publication/285737807_Usability_study_of_3D_Time-of-Flight_cameras_for_automatic_plant_phenotyping
11. Li J. 3D Machine Vision System for Robotic Weeding and Plant Phenotyping. Ph.D. Thesis, Iowa State University, Ames, IA, USA. 2014. URL: <https://dr.lib.iastate.edu/entities/publication/032b1abf-6350-45d9-8402-ed11da2c4bd5>
12. Сазонов Н. В., Мосяков М. А., Тетерин В. С., Панферов Н. С., Годяева М. М., Трунов М. С. Показатели качества работы автоматизированной машины для ухода за растениями картофеля в селекции и семеноводстве. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2024;18(1):60–67. DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-1-60-67> EDN: MAJKHM
13. 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. DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-4-2-5> EDN: KIGZDF
14. Казаков С. С., Живаев О. В., Никулин А. В. Конструкционные пути снижения повреждаемости клубней посадочного картофеля при работе цепочно-ложечного высаживающего аппарата. *Тракторы и сельхозмашины*. 2019;(3):29–34. DOI: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2019-3-29-34> EDN: ARTNCV
15. 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

References

1. Erokhin M. N., Dorokhov A. S., Sibirev A. V., Aksenov A. G., Mosyakov M. A., Sazonov N. V., Godyaeva M. M. Development and Modeling of an Onion Harvester with an Automated Separation System. *AgriEngineering*. 2022;4(2):380–399. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering4020026>
2. Izmaylov A. Yu., Kolchin N. N., Lobachevskiy Ya. P., Kynev N. G. Modern technologies and special equipment for potato production. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii* = Agricultural Machinery and Technologies. 2015;(3):43–47. (In Russ.). URL: <https://www.vimsmit.com/jour/article/viewFile/67/23>
3. Guo H., Lu H., Gao G., Wu t., Chen H., Qiu Z. Design and Test of a Levelling System for a Mobile Safflower Picking Platform. *Applied Sciences*. 2023;13(7):4465. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13074465>
4. Ponomarev A. G., Kolchin N. N., Zernov V. N., Petukhov S. N. Mechanization is necessary for breeding and seed growing of potato. *Kartofel' i ovoshchi* = Potato and Vegetables. 2017;(3):22–24. (In Russ.). URL: http://potatoveg.ru/wp-content/uploads/2018/04/3_2017.pdf
5. Krasnoshechekov N. V. Agroengineering strategy: from mechanization of agriculture to its intellectualization. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2010;(8):5–8. (In Russ.). URL: https://journals.eco-vector.com/0321-4443/article/view/68902/ru_RU#!
6. Dorokhov A. S., Aksenov A. G., Sibirev A. V., Mosyakov M. A. Analytical studies of machine-technological complexes for variety-phytocleaning of potato and vegetable crops in breeding and seed production. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2022;(4):76–82. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i4pp76-82>
7. Jahanbakhshi A. Determine some engineering properties of snake melon (*cucumis melo* var. *flexuosus*). *Agricultural Engineering International: The CIGR Journal*. 2018;(20):171–176. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Determine-some-engineering-properties-of-snake-melo-Jahanbakhshi/86e61051046dbacb1057bffe56f90a49f97ef5c>

8. Lehnert C., McCool Ch., Sa I., Perez T. Performance improvements of a sweet pepper harvesting robot in protected cropping environments. *Journal of Field Robotics*. 2020;37(7):1197–1223. DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.21973>
9. Qin Z., Xiaoliang Y. U. E., Bin L. I., Xianping J., Zheng X., Can X. U. Motion planning of picking manipulator based CTB_RRT algorithm. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 2021;52(10):129–136. URL: <https://www.nyjxxb.net/index.php/journal/article/view/1252>
10. Klose R., Penlington J., Ruckelshausen A. Usability study of 3D time-of-flight cameras for automatic plant phenotyping. *Bornimer Agrartechnische Berichte*. 2009;69:93–105. URL: https://www.researchgate.net/publication/285737807_Usability_study_of_3D_Time-of-Flight_cameras_for_automatic_plant_phenotyping
11. Li J. 3D Machine Vision System for Robotic Weeding and Plant Phenotyping. Ph.D. Thesis, Iowa State University, Ames, IA, USA. 2014. URL: <https://dr.lib.iastate.edu/entities/publication/032b1abf-6350-45d9-8402-ed11da2c4bd5>
12. Sazonov N. V., Mosyakov M. A., Teterin V. S., Panferov N. S., Godyaeva M. M., Trunov M. S. Quality metrics of automated machinery in potato plant cultivation for breeding and seed production. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii = Agricultural Machinery and Technologies*. 2024;18(1):60–67. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2024-18-1-60-67>
13. 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.). DOI: <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-4-2-5>
14. Kazakov S. S., Zhivaev O. V., Nikulin A. V. Structural ways to reduce the damage of planting potatoes bulbs when using a chain-spoon planting machine. *Traktory i sel'khozmashiny*. 2019;(3):29–34. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2019-3-29-34>
15. 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>

Сведения об авторах

Дорохов Алексей Семенович, доктор техн. наук, академик РАН, зам. директора по научно-организационной работе, 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/0000-0002-4758-3843>

✉ **Сибирев Алексей Викторович**, доктор техн. наук, профессор РАН, главный научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, 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/0000-0002-9442-2276>, e-mail: sibirev2011@yandex.ru

Мосяков Максим Александрович, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, 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/0000-0002-5151-7312>

Сазонов Николай Викторович, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник отдела технологий и машин в овощеводстве, 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/0000-0002-4899-9197>

Грищенко Александр Васильевич, магистрант, инженер отдела технологий и машин в овощеводстве, 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/0009-0005-3959-3047>

Information about the authors

Aleksey S. Dorokhov, DSc in Engineering, academician of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Scientific and Organizational Work, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4758-3843>

✉ **Aleksey V. Sibirev**, DSc in Engineering, professor of the Russian Academy of Sciences, chief researcher, the Department of Technologies and Machines in Vegetable Growing, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9442-2276>, e-mail: sibirev2011@yandex.ru

Maksim A. Mosyakov, PhD in Engineering, senior researcher, the Department of Technologies and Machines in Vegetable Growing, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5151-7312>

Nikolai V. Sazonov, PhD in Engineering, senior researcher, the Department of Technologies and Machines in Vegetable Growing, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4899-9197>

Alexander V. Grishchenko, master's student, engineer, the Department of Technologies and Machines in Vegetable Growing, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 5, 1st Institutskiy proezd, Moscow, Russian Federation, 109428, e-mail: vim@vim.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3959-3047>

✉ – Для контактов / Corresponding author

Построение модели движения внутрипочвенной влаги в склоновых обрабатываемых землях

© 2025. А. А. Михайлин 

ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет им. М. И. Платова», г. Новочеркасск, Российская Федерация

Недостаточная изученность динамики влагопереноса как в почве, разрыхленной рабочими органами орудия, так и в зоне необрабатываемой внутрипочвенной стенки в условиях меняющегося к влагодефицитному типу климата юга России, вызвала необходимость разработки математической модели внутрипочвенного влагопереноса. Отличительной особенностью этой модели является исследование влагопереноса в зоне обработанного новым мелиоративным способом верхнего слоя почвы глубиной 0,60 м разработанным универсальным почвообрабатывающим орудием для обработки склоновых и равнинных земель. Для исследования процесса увлажнения в обработанном новым способом пласта почвы на склоне были приняты следующие допущения: скелет грунта геометрически неизменяем; в рассматриваемой системе исключается гистерезис; влага внутри почвы не сжимается; давление воздуха внутри обработанного почвенного горизонта равно с атмосферным; капиллярные и гравитационные явления являются основной причиной движения влаги внутри обработанного пласта; внутрипочвенный влагоперенос относим к изотермическим процессам, используется декартова система координат, при этом ось z направлена вертикально вверх. Данные допущения позволяют рассматривать в модели движения внутрипочвенной влаги только динамику капиллярных сил и сорбции, происходящих из-за увлажнения почвы. В результате предложена математическая модель внутрипочвенного влагопереноса на базе уравнения Навье-Стокса для движения воды в пористой среде. Это позволяет определять основные параметры динамики влагопереноса в рассматриваемом слое: коэффициенты диффузивности, влагопроводности и капиллярно-сорбционного потенциала. Разработана компьютерная программа для решения краевой задачи динамики – внутрипочвенного влагопереноса на склоне с учётом неоднородных структур, полученных при обработке почвы новым способом.

Ключевые слова: мелиоративная обработка почвы, глубокое рыхление, склоновые земли, математическая модель, влажность, влагоперенос, диффузия, капиллярно-сорбционный потенциал, потенциал почвенной воды, движение влаги в почве

Благодарности: работа выполнена без финансового обеспечения в рамках инициативной тематики.

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

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Михайлин А. А. Построение модели движения внутрипочвенной влаги в склоновых обрабатываемых землях. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(1):196–207.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.196-207>

Поступила: 09.12.2024

Принята к публикации: 14.02.2025

Опубликована онлайн: 26.02.2025

Construction of a model of subsoil moisture movement in cultivated slope lands

© 2025. Andrey A. Mikhaylin 

Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russian Federation

Insufficient study of the dynamics of moisture movement both in the soil loosened by the tillage tool and in the zone of uncultivated subsoil wall in the conditions of moisture deficient south of Russia necessitated for development of a mathematical model of subsoil moisture transfer. A distinctive feature of this model is the study of moisture transfer in the zone of the upper soil layer of 0.60 m by the developed universal tillage tool for cultivating of sloping and plain lands. To study the moistening process in the slope soil layer treated by the new method, the following assumptions were made: the soil skeleton was geometrically unchanged; hysteresis was excluded in the system under consideration; the moisture inside the soil was not compressed; the air pressure inside the treated soil horizon was equal to the atmospheric pressure; capillary and gravitational phenomena were the main causes of moisture movement inside the treated layer; subsoil moisture transfer was related to isothermal processes; the Cartesian coordinate system was used, and the z-axis was directed vertically upwards. These assumptions made it possible to consider in the model of subsoil moisture movement only the dynamics of capillary forces and sorption occurring due to soil moistening. As the result, a mathematical model of subsoil moisture transfer was proposed on the basis of the Navier-Stokes equation for water movement in a porous medium. This let to determine the main parameters of the moisture transfer dynamics in the layer under consideration: the coefficients of diffusivity, moisture conductivity and capillary absorption capacity. At the same time, a computer program was developed to solve the boundary value problem of dynamics – subsoil moisture transfer on a slope, taking into account the heterogeneous structures obtained during soil treatment using a new method.

Keywords: reclamation treatment of soil, chiseling, slope lands, mathematical model, moisture, moisture transfer, diffusion, capillary absorption capacity, matric potential, moisture movement in soil

Acknowledgements: the work was done without financial support in the framework of the initiative topics.
The author thanks the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the author has stated that there is no conflict of interest.

For citations: Mikhaylin A. A. Construction of a model of subsoil moisture movement in cultivated slope lands. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):196–207. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.196-207>

Received: 09.12.2024

Accepted for publication: 14.02.2025

Published online: 26.02.2025

На обрабатываемых склоновых землях из-за негативного антропогенного воздействия возникает переуплотнение, приводящее к низкой скважности подпахотных горизонтов, что способствует появлению таких явлений, как поверхностный смыв и дефляция, что, в конечном счёте, и определяет их низкое плодородие. Вследствие изменения климата на юге России данная ситуация усугубляется низким дебетом атмосферной и внутрипочвенной влаги¹. Все это отражается в потере потенциально возможной высокой продуктивности земель. Длительное воздействие техногенной нагрузки на обрабатываемые агроландшафты может привести к окончательной деградации и выводу таких участков из фонда обрабатываемых земель.

Представленный ранее метод концептуального конструирования [1, 2] относится к области информационных технологий и соответствует парадигме целостности всего жизненного цикла исследуемого изделия^{2, 3}. Такой подход позволил разработать на объектном уровне базовый инвариант оптимальной структуры универсального почвообрабатывающего орудия и новый мелиоративный способ обработки склоновых земель, направленный на удержание внутрипочвенной влаги на склоне, в рамках системы мелиоративной обработки склоновых и равнинных земель (СМОСРЗ) в условиях меняющегося климата юга России к влагедефицитному типу [3, 4, 5].

Следующий этап исследования в рамках диалектического подхода предполагает переход от объектного уровня к конкретному, где для каждого объекта, как элемента структуры, определяются оптимальные для его эффективного функционирования значения параметров. Достижение заявленной в работе [1] глобальной цели в значительной мере зависит от создания в обработанной орудием почве соответствующих условий обеспечения влагой корневой системы

выращиваемых сельскохозяйственных культур. Недостаточная изученность динамики влагопереноса как в области разрыхленной рабочими органами орудия почвы, так и в зоне необрабатываемой внутрипочвенной стенки, сдерживает окончательное решение проблемы повышения эффективности технологических процессов и рабочих органов почвообрабатывающих орудий. В связи с вышеизложенным для предотвращения негативного влияния процессов деградации обрабатываемых почв и аккумуляции внутрипочвенной влаги на склоновых землях юга России в условиях изменения климата, а также восстановления их продуктивности и соответствующего устойчивого производства сельхозпродукции, необходимо создание на обрабатываемых склонах внутрипочвенных преград, образующихся на основе глубокого рыхления (до 0,60 м) слоя почвы [3, 4, 5]. Реализация этих положений требует создания инновационной системы деформаторов универсального глубокорыхлителя для обработки склоновых и равнинных агроландшафтов [6] и соответствующего исследования динамики влагопереноса на основе построения математической модели внутрипочвенного влагопереноса. Отличительными особенностями которой является исследование верхнего слоя почвы глубиной 0,60 м, обработанного новым мелиоративным способом с устройством внутрипочвенных стенок из переуплотнённой необработанной земли [7].

Цель исследований – разработка математической модели для определения параметров динамики влагопереноса: коэффициентов диффузивности, влагопроводности и капиллярно-сорбционного потенциала, а также разработка программы для решения краевой задачи динамики – внутрипочвенного влагопереноса на склоне, учитывая неоднородные структуры, полученные при обработке новым способом.

¹Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: общее резюме. М., 2014. 60 с.

URL: <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2016/od2/od2.pdf>

²Гаскаров Д. В. Интеллектуальные информационные системы. М.: Высшая школа, 2003. 431 с.

³Советов Б. Я., Яковлев С. А. Моделирование систем. М.: Высшая школа, 2001. 343 с.

Научная новизна – разработка математической модели, отражающей внутрипочвенный влагоперенос, отличающейся тем, что в ней исследуется верхний слой почвы глубиной 0,60 м, обработанный новым способом, который образует чередующиеся разрыхлённые области с внутрипочвенными стенками из переуплотнённой земли.

Материал и методы. Динамика почвенной влаги в разных направлениях и находящейся в различных связных и несвязных состояниях и как следствие доступность ее корням растений описываются разнообразными математическими моделями, содержащими системы дифференциальных уравнений с большим количеством эмпирических коэффициентов, точное значение которых варьирует в значительных пределах. Модели, основанные на гидродинамическом подходе и позволяющие описывать скорости и плотности водных потоков, несмотря на некоторые упрощения, обладают достаточной точностью в решении поставленной задачи влагопереноса через неоднородные структуры склонового почвенного горизонта в виде чередующихся разрыхлённых областей с внутрипочвенными стенками, полученными в результате его обработки новым способом.

Модели грунта отражают его различные состояния, а такие как глина, песок, плодородный слой почвы, торф и аналогичные им относятся к категории проницаемых сред, которые обладают сложной совокупностью твёрдых частиц непрерывной структуры, связанных между собой силами сцепления. При этом их архитектура зачастую точно не определена. Исходя из этого доскональное описание изменения динамики жидкости в толще почвы будет иметь большие затруднения. Поэтому математическую модель данных структур лучше всего представить в виде сплошной среды в каждом выделенном элементарном объёме пространства, который включает большое количество пор, обладает некоторыми осреднёнными физико-механическими характеристиками^{4, 5}.

Внутрипочвенная вода не является свободным субъектом, так как находится под воздействием сложной системы различных сил, таких как гравитационные, капиллярные,

осмотические, сорбционные. Это предполагает использование полного потенциала внутрипочвенной влаги как показателя, наиболее точно отражающего межфазные взаимодействия в почвенной среде. За идеальное состояние принимаем единичный объём, содержащий воду с нулевым осмотическим давлением, не подверженную влиянию адсорбционных и капиллярных сил, в которой отсутствуют растворённые соли, имеющую температуру T_0 , давление P_0 и определённую высоту залегания h_0 . Учитываем, что давление почвенной воды в выбранной системе координат величина отрицательная, но для его преодоления необходима работа, которая является величиной положительной.

Таким образом, движение влаги в почве происходит под действием гравитационных сил и градиента давления, обусловленного различием гидростатического напора и капиллярно-сорбционных сил в разных точках^{6, 7}.

В постановке модели динамики влагопереноса будем рассматривать дождевые осадки, выпадающие на параболический склон, обработанный новым мелиоративным способом на глубину 0,60 м – на базе глубокого рыхления. Профиль обработанного горизонта на склоне показан на рисунке 1 [8, 9].

На рисунке 2 представлены размеры зон – областей разрыхления, образующихся от стоек универсального глубокорыхлителя ГНЧ-0,6М, а также чередующихся с ними переуплотнённых промежутков – внутрипочвенных стенок [8, 9].

Результаты и их обсуждение. Динамика внутрипочвенной влаги на склоне совершается согласно законам фильтрации исходя из условия, что уровень влагонасыщения обработанного новым способом горизонта почвы не будет предельным. Учитывая это при построении модели движения внутрипочвенной влаги в склоновых обрабатываемых землях, примем следующие допущения:

- 1) совокупность твёрдых частиц почвы непрерывной структуры, связанных между собой силами сцепления, то есть её скелет будет геометрически стабильным;
- 2) влага внутрипочвенная не сжимается;
- 3) давление воздуха внутри обработанного почвенного горизонта равно атмосферному;

⁴Леонтьев Н. Е. Основы теории фильтрации: учебное пособие. 2-е изд., исправ. М.: ООО «МАКС Пресс», 2017. 88 с.

⁵Руководство по определению коэффициента фильтрации водоносных пород методом опытной откачки. П-717-80. М.: Энергоиздат, 1981. [Электронный ресурс]. URL: <http://base1.gostedu.ru/5/5486/> (дата обращения: 28.11.2024).

⁶Гаскаров Д. В. Указ. соч.

⁷Советов Б. Я., Яковлев С. А. Указ. соч.

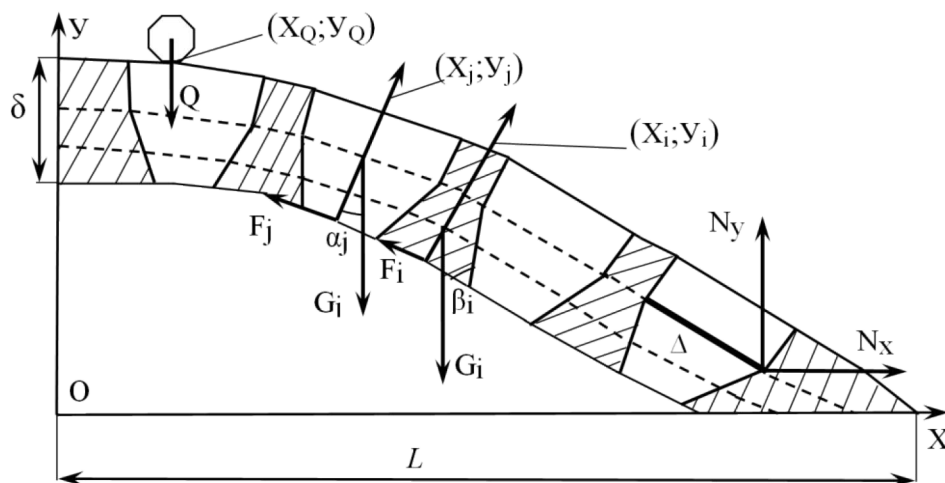


Рис. 1. Схема профиля обработанного слоя почвы на склоне /
Fig. 1. Diagram of the cultivated slope soil layer profile

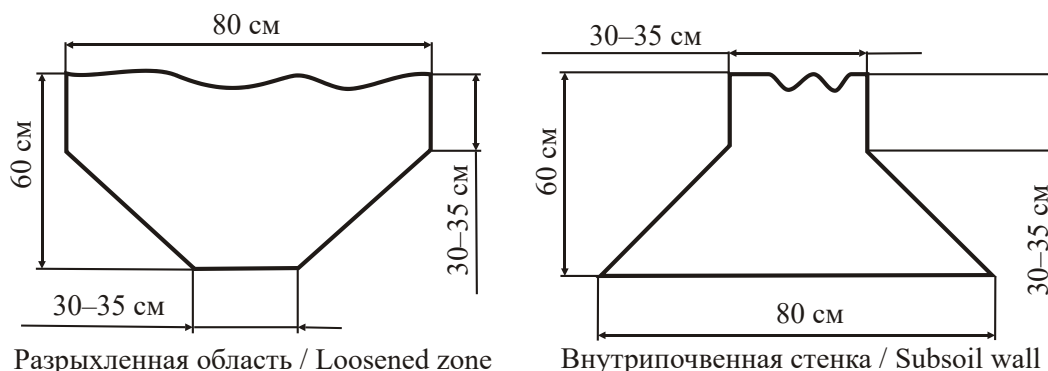


Рис. 2. Вид, размеры разрыхлённой области и внутрипочвенной стенки /
Fig. 2. View, dimensions of the loosened zone and the subsoil wall

4) капиллярные и гравитационные явления являются основной причиной движения влаги внутри обработанного пласта;

5) в рассматриваемой системе исключаем гистерезис;

6) внутрипочвенный влагоперенос относим к изотермическим процессам;

7) используем декартову систему координат, при этом ось z направлена вертикально вверх.

Данные допущения позволяют рассматривать в модели движения внутрипочвенной влаги только динамику капиллярных сил и сорбции, происходящих из-за увлажнения почвы.

Исходя из вышеперечисленных допущений, для разработки математической модели динамики внутрипочвенной влаги в обрабатываемом горизонте склона применим уравнения

Наве-Стокса для движения воды в пористой среде^{8,9} [9]:

$$\frac{\rho}{\phi} \frac{du}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \rho g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\mu}{\phi} \nabla^2 u, \quad (1)$$

$$\frac{\rho}{\phi} \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} - \rho g \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\mu}{\phi} \nabla^2 v, \quad (2)$$

$$\frac{\rho}{\phi} \frac{dw}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g + \frac{\mu}{\phi} \nabla^2 w, \quad (3)$$

где вводимые переменные u , v , w – представляют скорость движения почвенной влаги относительно координатных осей x , y , z соответственно; ρ – плотность находящейся внутри почвы жидкости; g – ускорение свободного падения; $h(x, y)$ – в рассматриваемой среде верхний уровень нахождения жидкости; μ – вязкость; ϕ – в рассматриваемом пласте отношение объема пор к общему объему почвы; ∇^2 – оператор Лапласа [10, 11].

⁸Леонтьев Н. Е. Указ. соч.

⁹URL: <http://base1.gostedu.ru/5/5486/>

Систему уравнений (1) – (3) преобразуем в векторный вид:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - g \nabla h + \frac{\mu}{\rho \phi} \nabla^2 \vec{v}, \quad (4)$$

так как при движении влаги в почве конвективные члены уравнения обычно малы и их не учитываем. Полученное уравнение представляет систему и, чтобы показать её как замкнутую, добавим уравнение состояния:

$$p = p(\theta, \rho) \quad (5)$$

и уравнение неразрывности, учитывая изменения почвенной влажности для ненасыщенной почвы. Полученное уравнение будет иметь вид:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (6)$$

где θ – объемная влажность почвы.

Гравитационные силы, влияющие на динамику внутрпочвенной влаги, представляем в виде величины gz (гравитационный потенциал). Действия капиллярных, осмотических и пленочных сил покажем, как влажностный (капиллярно-сорбционный) потенциал в виде выражения¹⁰ $\psi = \frac{p}{\rho g}$.

Преобразуем равенство (4), для этого введём величину, имеющую обозначение $\varphi = \psi + z$, затем умножив обе части равенства (4) на некоторое постоянное значение пористости ϕ , получаем, что увеличению в ϕ раз градиента φ соответствует такое же увеличение значения скорости движения влаги в почве $\vec{v}$. Исходя из выше предложенного решение уравнения (4) имеет вид:

$$u = -K_1 \frac{\partial \varphi}{\partial x}; v = -K_2 \frac{\partial \varphi}{\partial y}; w = -K_3 \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad (7)$$

где $K_i, i = 1, 2, 3$ - коэффициенты пропорциональности.

Представленные уравнения (7) показывают зависимость между изменением капиллярно-сорбционного потенциала и скорости фильтрации. Следовательно, оно полностью соответствует закону Дарси о фильтрации жидкостей и газов в пористых структурах, согласно его формулировке «при медленном

движении несжимаемой жидкости в неподвижной изотропной пористой среде скорость фильтрации линейно зависит от градиента давления»^{11, 12} [10, 11, 12].

Подставляя зависимости (7) в уравнение неразрывности (6), формулируем уравнение влагопереноса в почве на обработанном склоне новым мелиоративным способом на базе глубокого рыхления^{13, 14, 15, 16} [11, 12, 13]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_1 \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_2 \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_3 \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \quad (8)$$

или

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(K_1 \frac{\partial \psi}{\partial x} + K_1 \frac{\partial z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_2 \frac{\partial \psi}{\partial y} + K_2 \frac{\partial z}{\partial y} \right) = \\ &= \frac{\partial}{\partial z} \left(K_3 \frac{\partial \psi}{\partial z} + K_3 \frac{\partial z}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Во влагоненасыщенной почве влажностный потенциал ψ является функцией её влажности $\psi = \psi(\theta)$, исходя из этого, слагаемые $K_1 \frac{\partial \psi}{\partial x}, K_2 \frac{\partial \psi}{\partial y}, K_3 \frac{\partial \psi}{\partial z}$ в уравнении (9) запишем в другом виде^{17, 18, 19} [13]:

$$\begin{aligned} K_1 \frac{\partial \psi}{\partial x} &= K_1 \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial x}, K_2 \frac{\partial \psi}{\partial y} = \\ &= K_2 \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial y}, K_3 \frac{\partial \psi}{\partial z} = K_3 \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}. \end{aligned} \quad (10)$$

Величины K_i и $\frac{\partial \psi}{\partial \theta}, i = 1, 2, 3$ являются показателями свойств почвы и зависят от её влажности, и их произведение выглядит:

$$D_i = K_i \frac{\partial \psi}{\partial \theta}. \quad (11)$$

Подставим величины $D_i = K_i \frac{\partial \psi}{\partial \theta}$ в уравнение (9) и получим нелинейное уравнение диффузии в почве на обработанном склоне новым мелиоративным способом на базе глубокого рыхления. Данное уравнение примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(D_1 \frac{\partial \theta}{\partial x} + K_1 \frac{\partial z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_2 \frac{\partial \theta}{\partial y} + K_2 \frac{\partial z}{\partial y} \right) = \\ &= \frac{\partial}{\partial z} \left(D_3 \frac{\partial \theta}{\partial z} + K_3 \frac{\partial z}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (12)$$

для горизонтальных направлений: $\frac{\partial z}{\partial x} = 0$ и $\frac{\partial z}{\partial y} = 0$.

¹⁰Леонтьев Н. Е. Указ. соч.

¹¹Там же.

¹²Рекс Л. М., Кирейчева Л. В., Якиревич А. М. Методика расчета водно-солевого режима орошаемых земель. М.: ВНИИ гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова, 1984. 113 с.

¹³Рекс Л. М. Системные исследования мелиоративных процессов и систем. М.: Изд-во «Аслан», 1995. 192 с.

¹⁴Рекс Л. М., Кирейчева Л. В., Якиревич А. М. Указ. соч.

¹⁵Роде А. А. Основы учения о почвенной влаге. Т. 1. Вводные свойства почв и передвижение почвенной влаги. Л.: Гидрометеиздат, 1965 г. 664 с.

¹⁶Роуч П. Вычислительная гидродинамика. М.: Мир, 1980. С. 616.

¹⁷Роде А. А. Указ. соч.

¹⁸Роуч П. Указ. соч.

¹⁹Леонтьев Н. Е. Указ. соч.

Для вертикального направления $-\frac{\partial z}{\partial z} = 1$, уравнение (12) запишется [15, 16]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_1 \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_2 \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_3 \frac{\partial \theta}{\partial z} \pm K \right), \quad (13)$$

где $K = K(\theta) = K_3$ и называется коэффициентом влагопроводности.

В полученном уравнении (13), в последнем слагаемом его правой части знак "+" обозначает нисходящее движение внутрипочвенного влагопереноса, а знак "-" представляет движение влаги в почве по направлению вверх.

Капиллярные эффекты и сорбционные свойства слоя почвы глубиной 0,60 м на склоне учитываются величиной $D_i(\theta)$ в уравнениях диффузии влаги данного слоя (равенства (12) и (13)). При этом коэффициенты диффузии в толще рассматриваемого слоя почвы по направлениям x, y, z соответственно отражены величиной²⁰ $i = 1, 2, 3$ [10, 13, 14, 15].

В создаваемой математической модели возникает необходимость задания критериев, определяющих динамику внутрипочвенного влагопереноса в толще обработанного пласта склонового агроландшафта. Это потребовало задать водный потенциал обработанного горизонта на склоне: капиллярно-сорбционные свойства $\psi(\theta)$, диффузию $D_i(\theta)$, влагопроводность $K(\theta)$, являющиеся функциями влажности почвы. Адекватность решения задачи о динамике влагопереноса на склоне в слое почвы обработанного новым способом предполагает достаточную корректность выбора критериев движения внутрипочвенной влаги, при которых водно-физические характеристики будут отражаться моделью наиболее приемлемо. Функции $\psi(\theta)$, $D_i(\theta)$, $K(\theta)$ установим теоретически, исходя из того, что эти критерии уравнения динамики влагопереноса в почве коррелируются с главными в формулируемой математической модели водно-физическими характеристиками обработанного новым мелио-

ративным способом слоя земли глубиной 0,60 м на склоне, таким как пористость, влажность, максимальная гигроскопичность, коэффициент фильтрации и другие^{21, 22} [15, 16, 17].

Зависимость капиллярного давления от влажности почвы имеет вид:

$$\psi = -h_k^* \sqrt[3]{\frac{1}{v} \ln \frac{\theta - \theta^*}{\theta_0 - \theta^*}}, \quad \theta > \theta^*, \quad (14)$$

где h_k^* – условная высота капиллярного поднятия; θ – отношение объема влаги к объему почвы; θ_0 – отношения объема пор к общему объему почвы в исследуемом слое почвы; θ^* – связанная влага.

Покажем условие, при котором значения объемной влажности почвы больше связанной влаги – $\theta > \theta^*$, согласно этому условию, возникает интенсивное движение воды в жидкой фазе, то есть максимальная молекулярная влагоемкость (ММВ)²³ [13]. Но формула (14) не позволяет определить значения капиллярно-сорбционных свойств $\psi_0 = \psi(\theta^*)$. Гипотеза о том, что влагопроводность почвы рассматривается как функция объемного влагосодержания, а не как константа, позволяет обойти возникающее ограничение. При этом используем для построения математической модели наиболее известную полуэмпирическую модель С. Ф. Аверьянова, отражающую отношение коэффициента влагопроводности к уровню насыщения почвы влагой, представленную как степенная функция^{24, 25, 26, 27} [10, 13, 14, 15, 16]:

$$K(\theta) = K_0 \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta_0 - \theta_0} \right)^n, \quad (15)$$

где K_0 – коэффициент фильтрации рассматриваемого слоя почвы на склоне; θ_0 – максимальная гигроскопичность; n – показатель степени для коэффициента фильтрации, может принимать различные значения в зависимости от физико-механических свойств почв.

Учтём в первом приближении, что тождественность свойств почвы грунта – это совокупность твёрдых частиц непрерывной структуры, связанных между собой²⁸.

²⁰Леонтьев Н. Е. Указ. соч.

²¹Рекс Л. М. Указ. соч.

²²Рекс Л. М., Кирейчева Л. В., Якиревич А. М. Указ. соч.

²³Леонтьев Н. Е. Указ. соч.

²⁴Рекс Л. М. Указ. соч.

²⁵Рекс Л. М., Кирейчева Л. В., Якиревич А. М. Указ. соч.

²⁶Роде А. А. Указ. соч.

²⁷Роуч П. Указ. соч.

²⁸URL: <http://base1.gostedu.ru/5/5486/>

Исходя из этого, необходимые значения, приведённые для грунтов²⁹ в таблице 1 и 2 [10, 13], используем для представления существующих пределов физико-химических явлений, при составлении частного сценария по оценке влагопереноса при проведении дальнейших экспериментальных исследований в обрабо-

танном слое склоновых земель новым способом учитываем возможные изменения форм и размеров областей разрыхления и внутрипочвенных стенок.

В таблице 2 показаны соответствующие коэффициенты фильтрации для различных типов почв (грунтов) [10, 11, 12].

Таблица 1 – Показатель степени (n) для коэффициента фильтрации почв (грунтов) /
Table 1 – Exponent for the soil (ground) filtration coefficient

Механический состав / Mechanical composition	Значение n / Value n	
	нижняя граница / lower limit	верхняя граница / upper limit
Песчаный / Sandy	3,5	4,5
Супесчаный / Sandy loam	4,0	5,0
Легкосуглинистый / Light loam	4,5	5,5
Среднесуглинистый / Semi loam	5,5	9,0
Тяжелосуглинистый и глинистый / Heavy loam and clay	6,0	12,0

Таблица 2 – Коэффициент фильтрации для различных почв (грунтов) /
Table 2 – Filtration coefficient for different soils (grounds)

Механический состав / Mechanical composition	Коэффициент фильтрации / Filtration coefficient	
	см/с / cm/s	м/сутки / m/day
Песчаный с примесью / Sandy with impurities	1,00–0,01	8,64–0,64
Песчано-глинистый / Sandy clay	0,01–0,004	8,64–3,46
Проницаемый глинистый / Permeable clay	0,004–0,001	3,46–0,86
Тяжелый глинистый / Heavy clay	<0,001	<0,86

Применим аналог формулы С. Ф. Аверьянова, которая справедлива в диапазоне от наименьшей влагоёмкости θ^* до полной влагоёмкости обработанного слоя $\bar{\theta}$:

$$K(\theta) = K_0 \left(\frac{\theta - \theta^*}{\bar{\theta} - \theta^*} \right)^m, \quad (16)$$

где показатель степени для коэффициента фильтрации $m = \frac{7}{10} n$.

В таблице 3 показаны значения максимальной молекулярной влагоёмкости (ММВ) для нескольких горизонтов почвы. Представленный слой почвы А+ является верхним гумусовым горизонтом. Слой В – переходный слой к породе, имеет, в основном, бурый окрас

с постепенной или неравномерно затечной, языковатой, ослабляющейся к низу гумусированностью. По степени гумусированности слой почвы В может подразделяться на горизонты В1 и В2. Слой С – это материнская порода^{30, 31, 32} [11, 14].

Капиллярно-сорбционные свойства почвы обрабатываемых склонов, характеризующиеся значениями: условной высотой капиллярного поднятия (h_k^*), нижним пределом иссушения почвы (максимальная гигроскопичность) (θ_0) и полной влагоёмкостью ($\bar{\theta}$) для различных типов почв, приведены в таблице 4^{33, 34, 35, 36, 37, 38}.

²⁹Леонтьев Н. Е. Указ. соч.

³⁰Рекс Л. М., Кирейчева Л. В., Якиревич А. М. Указ. соч.

³¹Роде А. А. Указ. соч.

³²URL: <http://base1.gostedu.ru/5/5486/>

³³Почвоведение: учебник для ун-тов. В 2 ч. Под ред. В. А. Ковды, Б. Г. Розанова. Ч. 1. Почва и почвообразование. Г. Д. Белицина, В. Д. Васильевская, Л. А. Гришина [и др.]. М.: Высшая школа, 1988. 400 с.

³⁴Рекс Л. М. Указ. соч.

³⁵Рекс Л. М., Кирейчева Л. В., Якиревич А. М. Указ. соч.

³⁶Роде А. А. Указ. соч.

³⁷Роуч П. Указ. соч.

³⁸URL: <http://base1.gostedu.ru/5/5486/>

Таблица 3 – Значения максимальной молекулярной влагоемкости (ММВ) в слоях почвы /
Table 3 – Values of maximum molecular moisture capacity (MaxMMC) in soil layers

Слой почвы / Soil layer	Наименьшая влагоемкость (НВ), % / Minimum moisture capacity (MinMC), %	ММВ, % от НВ / MaxMMC, % of MinMC
A+, B	23,1	63,2
B1	19,6	61,0
B2	18,4	62,0
C	18,6	59,7

Таблица 4 – Величины, характеризующие капиллярные и сорбционные свойства почвы /
Table 4 – Values characterizing the soil capillary and absorption properties

Механический состав / Mechanical composition	$\bar{\theta}$, %	θ_0 , %	h_k^* , м
Песчаный / Sandy	0,37–0,40	0,05–0,10	0,5–1,2
Супесчаный / Sandy loam	0,40–0,44	0,08–0,13	0,7–1,5
Легкосуглинистый / Light loam	0,44–0,48	0,10–0,15	1,5–2,5
Среднесуглинистый / Semi loam	0,40–0,44	0,13–0,18	2,5–3,5
Тяжелосуглинистый и глинистый / Heavy loam and clay	0,43–0,49	0,16–0,25	4,0–7,0

Примечания: $\bar{\theta}$ – максимальная гигроскопичность, θ_0 – полная влагоемкость, h_k^* – условная высота капиллярного поднятия жидкости /

Notes: $\bar{\theta}$ – maximum hygroscopicity, θ_0 – full moisture capacity, h_k^* – the conditional height of the capillary rise of the liquid

Приравнивая формулы (15) и (16), окончательно получим максимальную молекулярную влагоемкость:

$$\theta^* = \frac{\bar{\theta}(\bar{\theta}-\theta_0)^{\frac{10}{7}} - \bar{\theta}(\bar{\theta}-\theta_0)^{\frac{10}{7}}}{(\bar{\theta}-\theta_0)^{\frac{10}{7}} - (\bar{\theta}-\theta_0)^{\frac{10}{7}}}. \quad (17)$$

Формула (17) отражает основную гидрофизическую характеристику, представляющую зависимость капиллярного давления от влажности разрыхленного слоя почвы на склоне (14), что позволяет находить капиллярное давление в разных условиях, включая ММВ по зависимости:

$$\psi = -h_k^* \sqrt[3]{\frac{10}{7v} \ln \frac{\theta-\theta_0}{m-\theta_0}}, \theta \geq \theta^*. \quad (18)$$

Для нахождения взаимного влияния коэффициентов диффузии от влажности почвы лучше всего использовать уравнения влагопереноса, в которых определяются коэффициенты диффузии и влагопроводности. Это соответствует, так называемой, обратной задаче, которая позволяет определить параметры влагопереноса в почве с помощью двумерной математической модели нестационарного влагопереноса в почвенных горизонтах. Однако теоретическое определение этих коэффици-

ентов весьма затруднительно. В этом случае для нахождения гидрофизических характеристик используются значения, полученные эмпирическим путём, что позволяет решать задачи такого типа³⁹ [14, 15].

Одно из решений подобных задач возможно при использовании модели пористой среды, выбор которой определяется частной задачей. Для решения задачи влагопереноса через внутрисочвенную стенку наилучший результат даёт метод Дж. Гарднера, устанавливающий экспоненциальный характер зависимости коэффициента диффузии от влажности:

$$D_i(\theta) = D_0 \exp[\beta(\theta - \theta^*)], \quad (19)$$

где β – критерий, учитывающий вид среды, в нашем случае почвы как пористой среды; D_0 – коэффициент диффузии при начальной влажности $\theta = \theta^{*40, 41}$ [11, 12, 14, 16].

В таблице 5 представлены, в зависимости от направления влагопереноса, значения коэффициента диффузии D_0 и значения β при различной начальной влажности почвы. Влажность показана в долях от наименьшей влагоемкости (НВ)^{42, 43} [12, 14, 16, 17].

³⁹Почвоведение. М., 1988.

⁴⁰Леонтьев Н. Е. Указ. соч.

⁴¹Рекс Л. М., Кирейчева Л. В., Якиревич А. М. Указ. соч.

⁴²Леонтьев Н. Е. Указ. соч.

⁴³Рекс Л. М., Кирейчева Л. В., Якиревич А. М. Указ. соч.

Таблица 5 – Значения коэффициентов диффузии от влажности почвы в зависимости от направления влагопереноса /

Table 5 – Values of diffusion coefficients to soil moisture in dependence of the moisture movement direction

Направление движения влаги / Moisture movement direction	Горизонтальное / Horizontal		Вверх вертикально / Vertically upwards		Вниз вертикально / Vertically downwards	
Начальная влажность / Initial moisture	D_0	β	D_0	β	D_0	β
65 % HB / MinMC	0,000126	57,118	0,001959	33,258	0,006281	39,409
75 % HB / MinMC	0,005266	39,86	0,01	27,674	0,009198	29,701
85 % HB / MinMC	0,047	31,073	0,047	23,145	0,042	24,854

Примечания: D_0 – коэффициент диффузии, β – вид среды /

Notes: D_0 – diffusion coefficient, β – type of environment

Следующим этапом для построения модели влагопереноса является установление начальных и краевых (граничных) критериев для обработанного пласта почвы на склоне, структурными составляющими которого являются чередующиеся разрыхленные области и внутрипочвенные стенки. При этом они имеют резко отличающиеся друг от друга водно-физические характеристики. В связи с этим, в качестве начального критерия устанавливаем исходное распределение влаги. Следовательно, максимальная гигроскопичность запишется [15, 16]:

$$\theta_0 = \theta(x, y, z, 0) = \theta^*. \quad (20)$$

Далее установим краевой критерий на границе почвы и воздуха, определяющий причину увлажнения почвы на склоне:

$$I = -K \left. \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|_{z=z'} = - \left(D_3(\theta) \left. \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|_{z=z'} + K(\theta) \right), \quad (21)$$

при $z = z'$; где I – мощность выпадающих дождей; $z' = z'(x, y)$ – функция, описывающая параметры обработанного склона (уклон, протяжённость) с внутрипочвенными стенками [14, 15].

Затем определяется зависимость объёмной влажности почвы к связанной влаге в окрестности нижней границы расчётной зоны обработанного пласта. Для нашего случая принимаем [15, 16]:

$$\theta = \theta^* \text{ при } z = z' - H, \quad (22)$$

где H – глубина исследуемой расчётной зоны увлажнения (толщина обработанного горизонта на склоне).

Завершающим этапом в разработанной модели движения влагопереноса на обработанном новым способом склоне является установление условия свободного протекания через расчётную зону, принимая её как пористое тело. Исходя из этого на боковых границах этой зоны установим:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \bar{n}} = 0, \quad (23)$$

где $\bar{n}$ – просветность^{44, 45, 46} [15, 16].

При составлении компьютерной программы для решения математической модели динамики влагопереноса (8)...(23) используем программный комплекс FlexPDE, который предназначен для построения сценарных моделей решения заданных дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов и представления результатов в графической форме.

На рисунке 3 показана блок-схема решения краевой задачи динамики внутрипочвенного влагопереноса на обработанном новым способом склоне. При необходимости представленный сценарий редактируем, затем цикл расчёта снова запускается и так до тех пор, пока результат не удовлетворит всем заданным требованиям.

Заключение. Разработана математическая модель внутрипочвенного влагопереноса на склоне, обработанном новым мелиоративным способом, направленным на внутрипочвенное влагоудержание. В ней исследуется обработанный верхний слой почвы глубиной 0,60 м с устройством внутрипочвенных стенок на базе глубокого рыхления.

⁴⁴Леонтьев Н. Е. Указ. соч.

⁴⁵Рекс Л. М., Кирейчева Л. В., Якиревич А. М. Указ. соч.

⁴⁶Роуч П. Указ. соч.

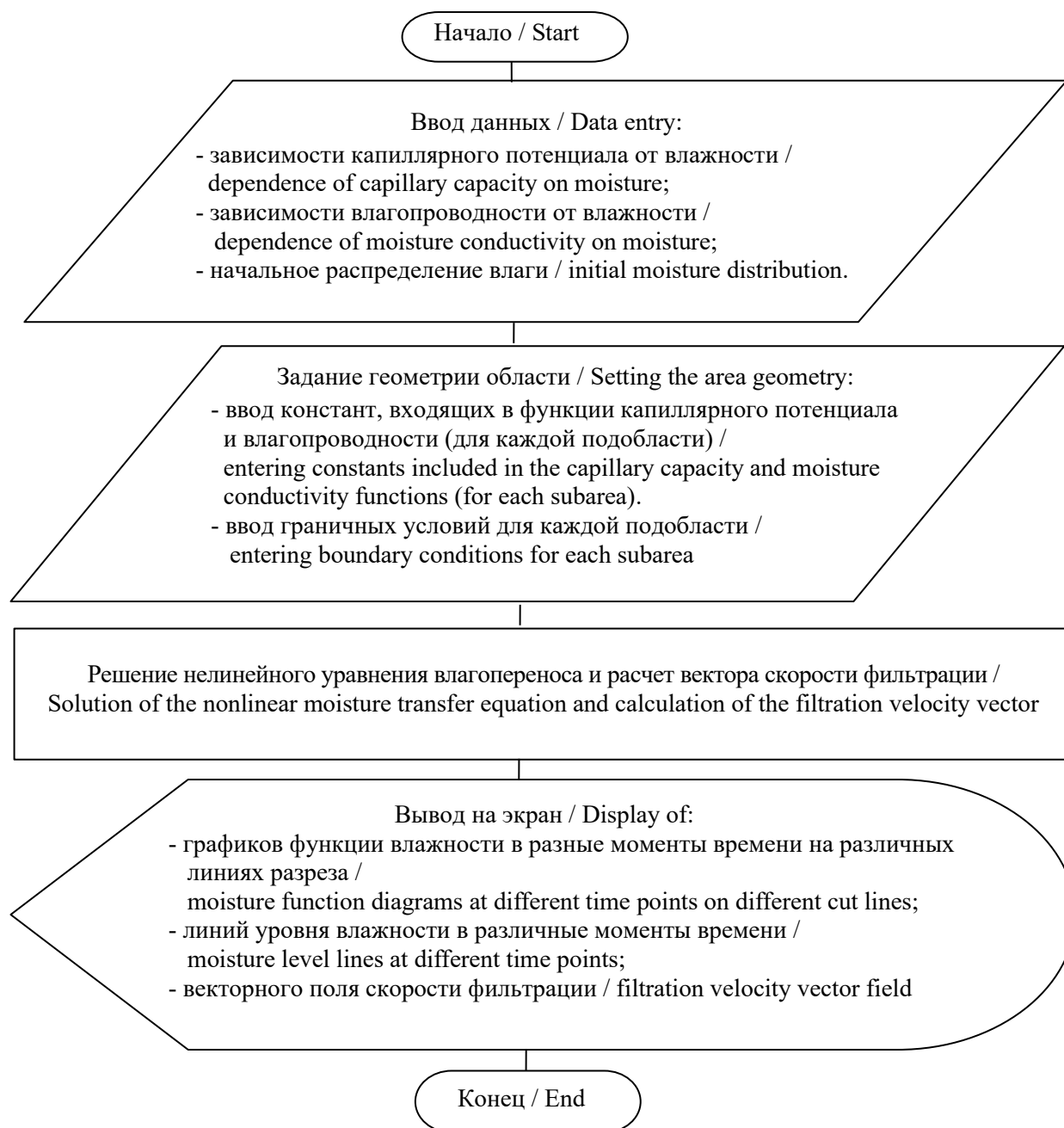


Рис. 3. Блок-схема решения краевой задачи динамики внутрипочвенного влагопереноса /
Fig. 3. A flowchart for solving the boundary value problem of the dynamics of subsoil moisture transfer

Данная модель разработана на базе уравнения Навье-Стокса для движения воды в пористой среде, учитывающая зависимость между изменением капиллярно-сорбционного потенциала и скорости фильтрации. Модель позволяет определять параметры динамики влагопереноса такого обработанного слоя: коэффициенты диффузивности, влагопроводности и капиллярно-сорбционного потенциала. Установлены граничные и начальные условия:

начальное распределение влаги, краевое условие на границе почвы и воздуха. На основе полученной модели разработана программа для решения краевой задачи динамики внутрипочвенного влагопереноса на обработанном новом способе склоне, учитывая неоднородные структуры склонового почвенного горизонта в виде чередующихся разрыхлённых областей с внутрипочвенными стенками.

Список литературы

1. Максимов В. П., Михайлин А. А. Создание универсального орудия для мелиоративной обработки равнин и склонов на основе концептуального конструирования. *Аграрный научный журнал*. 2024;(3):110–117. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i3pp110-117> EDN: CIEJUJ
2. Максимов В. П., Михайлин А. А. Анализ функциональных требований к системе мелиоративной обработки склоновых и равнинных земель. *Аграрный научный журнал*. 2024;(7):117–124. DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i7pp117-124> EDN: MGISPQ
3. Щедрин В. Н., Масный Р. С., Манжина С. А., Куприянова С. В. Стратегический подход к развитию мелиорации в условиях меняющегося климата. *Мелиорация и водное хозяйство*. 2022;(2):11–17. DOI: <https://doi.org/10.32962/0235-2524-2022-2-11-18> EDN: KVGWSI
4. Пындак В. И., Новиков А. Е. Обоснование рабочих органов для глубокого рыхления почвы при возделывании ширококоридных пропашных культур в условиях орошения. *Известия Нижневолжского агро-университетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*. 2012;(2):161–165. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17773645> EDN: NMBFJO
5. Полуэктов Е. В., Сухомлинова Н. Б. Анализ эффективности почвозащитных приемов и мероприятий по их стокорегулирующей способности. *Мелиорация и гидротехника*. 2022;12(1):99–118. DOI: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-1-99-118> EDN: BSVHQT
6. Михайлин А. А. Универсальный глубокорыхлитель навесной чизельный: пат. № 2694571 Российская Федерация. № 201714056: заявл. 21.11.2017; опубл. 21.05.2019. Бюл. № 15. 5 с. Режим доступа: https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
7. Михайлин А. А. Способ обработки склоновых почв: пат. № 2255450 Российская Федерация. № 2002108073/12: заявл. 29.03.2002; опубл. 10.07.2005. Бюл. №19. 5 с. Режим доступа: https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
8. Михайлин А. А. Постановка математической модели устойчивости обработанного пласта почвы на склоне. *Природообустройство*. 2009;(2):92–94. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12924471> EDN: KWVMMKJ
9. Михайлин А. А. Анализ устойчивости обрабатываемых влагонасыщенных склоновых почв. *Инженерный вестник Дона*. 2012;(4-1(22)):38. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18640036> EDN: PRXKEP
10. Кучмент Л. С. Модели процессов формирования речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 144 с.
11. Вабищевич П. Н., Данияров А. О. Математическое моделирование промачивания зоны аэрации в условиях близкого залегания грунтовых вод. *Математическое моделирование*. 1994;6(11):11–23. Режим доступа: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=mm&paperid=1925&option_lang=rus
12. Вабищевич П. Н., Данияров А. О., Пулатов П. А. Численное моделирование увлажнения грунта. *Математическое моделирование*. 1991;3(6):3–9. Режим доступа: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=mm&paperid=2234&option_lang=rus
13. Рекс Л. М., Якиревич А. М., Файбишенко Б. А. Моделирование процесса формирования водно-солевого режима орошаемых почв. *Мелиорация и водное хозяйство*. 1990;(6):16–19.
14. Ахмедов А. Д. Аналитический подход к определению некоторых водно-физических характеристик почвогрунтов. Роль мелиорации и водного хозяйства в реализации национальных проектов: мат-лы между-народ. научн.-практ. конф. М.: Московский государственный университет природообустройства, 2008. Ч. 1. С. 21–27.
15. Боровой Е. П., Ветренко Е. А. Аналитический подход к определению параметров контура увлажнения почвы на основе решения уравнения влагопереноса. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование*. 2009;(4(16)):52–57. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12982653> EDN: KYCPCB
16. Бузало Н. С., Захарченко Н. С. Математическое моделирование динамики влагопереноса в обрабатываемом слое почвы. *Новая наука: от идеи к результату*. 2017;(3-2):185–187. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28826469> EDN: YGVVBL
17. Guo Y., Wang Q., Liu Ya., Zhang J., Wei K. Water and salt transport characteristics in a soil column in the presence of a low-permeable body. *Canadian Journal of Soil Science*. 2022;102(4):991–999. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjss-2022-0061>

References

1. Maksimov V. P., Mikhaylin A. A. Creation of a universal tool for reclamation cultivation of plains and slopes based on conceptual design. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2024;(3):110–117. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i3pp110-117>
2. Maksimov V. P., Mikhaylin A. A. Analysis of functional requirements for the system of reclamation treatment of slopes and plains lands. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* = The Agrarian Scientific Journal. 2024;(7):117–124. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i7pp117-124>

3. Shchedrin V. N., Masnyy R. S., Manzhina S. A., Kupriyanova S. V. Strategic approach to development of reclamation in a changing climate. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* = Melioration and Water Management. 2022;(2):11–17. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32962/0235-2524-2022-2-11-18>
4. Pyndak V. I., Novikov A. E. Justification of working bodies for deep loosening of the soil during cultivation of wide-row row crops under irrigation conditions. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* = Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education. 2012;(2):161–165. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17773645>
5. Poluektov E. V., Sukhomlinova N. B. Analysis of the efficiency of soil conservation practices and measures for their flow-regulating ability. *Melioratsiya i gidrotekhnika* = Land Reclamation and Hydraulic Engineering. 2022;12(1):99–118. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-1-99-118>
6. Mikhaylin A. A. Universal mounted chisel deep tiller: patent RF, no. 2694571. 2019. URL: https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
7. Mikhaylin A. A. The method of cultivating sloping soils: patent RF, no. 2255450. 2005. URL: https://fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
8. Mikhaylin A. A. Statement of the mathematical model of the strength of the cultivated soil layer on the slope. *Prirodoobustroystvo*. 2009;(2):92–94. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12924471>
9. Mikhaylin A. A. Stability analysis of slope cultivated wetland soils. *Inzhenernyy vestnik Dona* = Engineering Journal of Don. 2012;(4-1(22)):38. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18640036>
10. Kuchment L. S. Models of river flow formation processes. Leningrad: *Gidrometeoizdat*, 1980. 144 p.
11. Vabishchevich P. N., Daniyarov A. O. Mathematical modelling of wetting of the aeration zone in conditions of the nearly bedding subsoil waters. *Matematicheskoe modelirovanie*. 1994;6(11):11–23. (In Russ.). URL: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=mm&paperid=1925&option_lang=rus
12. Vabishchevich P. N., Daniyarov A. O., Pulatov P. A. Numerical modelling of ground moistening. *Matematicheskoe modelirovanie*. 1991;3(6):3–9. (In Russ.). URL: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=mm&paperid=2234&option_lang=rus
13. Reks L. M., Yakirevich A. M., Faybisenko B. A. Modeling of the formation of the water-salt regime of irrigated soils. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo* = Melioration and Water Management. 1990;(6):16–19. (In Russ.).
14. Akhmedov A. D. An analytical approach to the determination of some water-physical characteristics of soils. The role of land reclamation and water management in the implementation of national projects: Proceedings of the international scientific and practical conference. Moscow: *Moskovskiy gosudarstvennyy universitet prirodoobustroystva*, 2008. Part. 1. pp. 21–27.
15. Borovoy E. P., Vetenko E. A. Analytical approach to soil moistening contour parameters determination based on moisture transportation equation solution. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* = Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education. 2009;(4(16)):52–57. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12982653>
16. Buzalo N. S., Zakharchenko N. S. Mathematical modeling of the dynamics of moisture transfer in the cultivated soil layer. *Novaya nauka: ot idei k rezul'tatu*. 2017;(3-2):185–187. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28826469>
17. Guo Y., Wang Q., Liu Ya., Zhang J., Wei K. Water and salt transport characteristics in a soil column in the presence of a low-permeable body. *Canadian Journal of Soil Science*. 2022;102(4):991–999. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjss-2022-0061>

Сведения об авторе

✉ **Михайлин Андрей Андреевич**, кандидат техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова», ул. Просвещения, д. 132, г. Новочеркасск, Ростовская обл., Российская Федерация, 346428, e-mail: rektorat@npi-tu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7952-5699>, e-mail: mih_2005@rambler.ru

Information about the author

✉ **Andrey A. Mikhaylin**, PhD in Engineering, associate professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), 132, Prosveshcheniya str., Novocherkassk, Rostov Region, Russian Federation, 346428, e-mail: rektorat@npi-tu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7952-5699>, e-mail: mih_2005@rambler.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.208–216>



УДК 631.3:631.17

История вятской агроинженерной науки (к 130-летию ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока)

© 2025. В. А. Сысуев ✉

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

В статье дан краткий обзор 70-летнего развития агроинженерной науки в Федеральном аграрном научном центре Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого – научном учреждении со 130-летней историей. Описаны этапы становления – от отдела механизации (1955–1995 гг.) до научно-инженерного центра (с 1995 г. по н. в.), включающего изначально лаборатории механизации полеводства, зерно- и семяочистительных машин, механизации животноводства, инженерно-технического развития АПК, проектно-конструкторское бюро, где работали свыше 80 инженерно-технических работников, из них 8 докторов, 15 кандидатов технических наук и 14 аспирантов-механиков. За последние 29 лет учеными-агроинженерами разработано свыше 40 наименований новых энергосберегающих технологий и машин для механизации растениеводства и животноводства, новизна которых защищена более 150 авторскими свидетельствами и патентами РФ на изобретения. Освоено серийное производство более 60 конструкций новых машин и оборудования. В аспирантуре по техническим специальностям прошло обучение 68 человек, 47 из них с защитой диссертации. Успешно функционировали, начиная с 1996 г., диссертационные советы, в которых защищено 108 диссертаций, из них 17 докторских.

Ключевые слова: механизация животноводства, механизация растениеводства, серийное производство, подготовка научных кадров

Благодарности: работа выполнена без финансового обеспечения в рамках инициативной тематики.

Конфликт интересов: автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Сысуев В. А. История вятской агроинженерной науки (к 130-летию ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока). Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(1):208–216. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.208-216>

Поступила: 20.06.2024

Принята к публикации: 11.10.2025

Опубликована онлайн: 26.02.2025

The history of Vyatka agroengineering science (to the 130th anniversary of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky)

© 2025. Vasiliy A. Sysuev ✉

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

The article provides a brief overview of the 70-year development of agroengineering science at the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, a scientific institution with a 130-year history. The stages of formation are described – from the Department of Mechanization (1955–1995) to the scientific and engineering center (from 1995 to present), which initially included laboratories for field husbandry mechanization, grain and seed cleaning machines, livestock mechanization, agricultural engineering and technical development, and a design bureau with over 80 engineering and technical staff members, including 8 doctors, 15 candidates of technical science, and 14 graduate students in mechanics. Over the past 29 years, agricultural engineers have developed over 40 names of new energy-saving technologies and machines for the mechanization of crop and livestock production, the design of which is protected by more than 150 copyright certificates and patents of the Russian Federation for inventions. Mass production of more than 60 designs of new machines and equipment has been mastered. Sixty-eight people have completed postgraduate studies in technical specialties, 47 of them have defended their dissertations. Dissertation councils have been successfully functioning since 1996, in which 108 dissertations have been defended, 17 of them doctoral ones.

Keywords: mechanization of animal husbandry, mechanization of crop production, mass production, training of scientific personnel

Acknowledgements: the work was carried out without financial support within the framework of the initiative.

Conflict of interest: the author has stated that there is no conflict of interest.

For citation: Sysuev V. A. The history of Vyatka agroengineering science (to the 130th anniversary of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(1):208–216. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.1.208-216>

Received: 20.06.2024

Accepted for publication: 11.10.2025

Published online: 26.02.2025

Первым научно-техническим подразделением в Кировской области был *отдел механизации*, организованный в 1955 г. при НИИСХ Северо-Востока в составе трех научных сотрудников во главе с кандидатом технических наук В. И. Головиных. В последующие годы отдел механизации возглавляли опытные специалисты кандидаты и доктора наук М. У. Фетисов (1968–1970 гг.), А. П. Шехурдин (1970–1975 гг.), Б. М. Мильман (1975–1979 гг.), Т. И. Смирнов (1979–1981 гг.), А. Д. Кормщиков (1981–1982 гг.), В. В. Смирнов (1982–1983 гг.), П. В. Яговкин (1984–1989 гг.). С 1989 по 1995 г. отдел возглавлял В. А. Сысуев.

В 1995 году был организован научно-инженерный центр (руководитель – академик Россельхозакадемии, доктор технических наук В. А. Сысуев) (рис. 1.).

Научно-инженерный центр включал пять подразделений (лаборатории механизации полеводства, зерно- и семяочистительных машин, механизации животноводства, инженерно-технического развития АПК и проектно-конструкторское бюро (ПКБ)), где работали свыше 80 инженерно-технических работников, из них 8 докторов, 15 кандидатов технических наук и 14 аспирантов-механиков.

В настоящее время в агроинженерном центре ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока (далее – Центр) функционирует три лаборатории.

За последние 29 лет было разработано свыше 40 наименований новых энергосберегающих технологий и машин для механизации растениеводства и животноводства, новизна которых защищена более 150 авторскими свидетельствами и патентами РФ на изобретения.

Учеными Центра установлены тесные связи с коллегами из зарубежных стран (Польша, Венгрия, Турция, Китай, Болгария, Украина, Беларусь). С этого времени регулярно проводятся международные научно-практические конференции и симпозиумы, публикуются научные материалы, проводится стажировка ученых и совместные научные исследования.

Укрепились творческие связи ученых отдела механизации со многими предприятиями-производителями сельхозтехники: ОАО ВМП «Авитек», ЗАО ПКФ «Завод Почвомаш», АО «Яранский механический завод», ОАО «Белохолуницкий машиностроительный завод», АО «Слободской ремонтно-механический завод» и другими.

Лаборатория механизации полеводства создана в 1989 г. для разработки и внедрения в производство почвозащитных, ресурсосберегающих технологий и технических средств для основной и предпосевной обработки почвы, внесения минеральных удобрений, восстановления и повышения продуктивности кормовых угодий.

Лабораторией заведовали доктора техн. наук А. Д. Кормщиков (1989–2001 гг.), В. Л. Андреев (2001–2013 гг.). С 2013 г. по настоящее время лабораторию возглавляет С. Л. Дёмшин. В разные годы сотрудниками лаборатории являлись доктора техн. наук, профессора Р. Ф. Курбанов и В. Е. Саитов.

В первые годы работы проведен значительный объем исследований по совершенствованию технических средств возделывания сельскохозяйственных культур на склоновых эрозионно-опасных землях [1]. Разработана техническая документация и изготовлены опытные образцы почвозащитных рабочих органов и машин для обработки склоновых земель: набора сменных рабочих органов плоскорезов-глубококорыхлителей; орудия для поверхностной обработки почвы; плоскореза-глубококорыхлителя с изменяемой шириной захвата; плуга для трехъярусной обработки почвы; широкозахватной машины для внесения минеральных удобрений.

Для более интенсивного крошения поверхностного слоя при безотвальной обработке почвы предложен комбинированный рабочий орган, включающий плоскорезную лапу и рыхлители в виде игольчатых дисков.

Наработки, полученные в ходе исследований, были использованы при разработке совместно с ОАО «Кировпочвомаш» культиватора-плоскореза-глубококорыхлителя КПП-3, предназначенного для безотвальной обработки почвы с сохранением стерни и других пожнивных остатков с целью защиты почвы от водной и ветровой эрозии. Корпусы плоскорезов могут работать на глубине от 13 до 35 см, обеспечивая качественное крошение почвы и подрезание сорных растений.

В результате испытаний отмечены: простота в обслуживании; хорошее качество крошения почвы; высокая защита почвы от эрозии; надежность технологического процесса. Решением Кировской МИС рекомендован к постановке на производство.



Рис. 1. Сотрудники научно-инженерного центра (2002 г.): 1 ряд (слева направо): А. В. Алешкин, Н. Н. Яговкина, Т. В. Соколова, Н. Н. Соболева, В. А. Сысуюев, П. А. Савиных, А. Д. Кормишников, А. И. Бурков, В. Л. Андреев; 2 ряд (слева направо): В. В. Шилин, А. В. Палкин, М. В. Симонов, К. Ю. Микрюков, Н. А. Черныгачев, Н. В. Турубанов, В. В. Немчанинов, В. С. Халтурин, О. П. Рошин, А. В. Кислицын, С. Ю. Устюгов, А. Л. Глушков, С. Л. Демшин, Р. Ф. Курбанов, В. А. Одеров, О. А. Шубин, П. А. Шулаков /

Fig. 1. Staff of the Scientific and Engineering Center (2002): 1 row (from left to right): A. V. Aleshkin, N. N. Yagovkina, T. V. Sokolova, N. N. Soboleva, V. A. Sysyuev, P. A. Savinykh, A. D. Kormshchikov, A. I. Burkov, V. L. Andreev; 2 row (from left to right): V. V. Shilin, A. V. Palkin, M. V. Simonov, K. Yu. Mikryukov, N. A. Chernyat'ev, N. V. Turubanov, V. V. Nemchaninov, V. S. Khalturin, O. P. Roshchin, A. V. Kisitsyn, S. Yu. Ustyugov, A. L. Glushkov, S. L. Demshin, R. F. Kurbanov, V. A. Odegov, O. A. Shubin, P. A. Shulakov

В начале 2000-х годов на основе конструкции прототипа орудия совместно с ВМП «Авитек» разработан комбинированный агрегат РБВК-3,6 для поверхностной обработки почвы. Выпущена опытная партия машин. Во время приемочных испытаний РБВК-3,6 за один проход обеспечивалась предпосевная обработка почвы на глубину до 12 см при уничтожении 98 % сорных растений [2, 3].

На основании результатов исследований прямого полосного посева бобовых трав в луговую дернину на естественных пойменных сенокосах р. Вятка разработана технология полосного посева, при которой дернина и травостой разрушаются фрезерным рабочим органом [4, 5]. Прямой посев семян трав в дернину выполняется сеялкой с фрезерными сошниками двумя поло-

сами шириной по 110 мм, образующими ленту шириной 330 мм, расстояние между осями лент 700 мм, расстоянием между лентами 370 мм.

Технология повышения продуктивности сенокосов и пастбищ путем посева семян трав в дернину с использованием сеялок СДК позволяет в 1,7–2,0 раза повысить урожайность трав, улучшить ботанический состав травостоев и, соответственно, качество корма, экономить семена трав и удобрений, в 3–4 раза уменьшить энергозатраты и расход топлива по сравнению с традиционными способами улучшения природных кормовых угодий.

Для осуществления данной технологии сотрудниками ФГБНУ НИИСХ Северо-Востока и ОАО ВМП «Авитек» разработано семейство дернинных сеялок СДК (рис. 2).



Рис. 2. Сеялки СДК-2,8 в сборочном цехе ФГУП ВМП «Авитек» /
Fig. 2. SDK-2.8 seeders in the assembly shop of FSUE VMP "Avitek"

Сеялки СДК-2,8 и СДКП-2,8 по результатам Всероссийских агропромышленных выставок «Сельскохозяйственная техника и оборудование для отраслей АПК» (ВВЦ, г. Москва) в 1998 и 2000 гг. отмечены серебряными медалями и Дипломами второй степени. К настоящему времени дернинные сеялки СДК-2,8, в количестве 108 штук приобретены сельхозтоваропроизводителями 26 областей, число выпущенных сеялок СДКП-2,8 составляет 42 штуки.

В настоящее время проводится совершенствование дернинных сеялок СДК, которое направлено на снижение металлоёмкости, повышение качества обработки дернины и надёжности конструкции сеялки. Дальнейшим развитием данного класса машин стала навесная комбинированная сеялка СДК-2,8М для тракторов класса 14 кН, которая предназначена для осуществ-

ления полосного посева семян трав в дернину природных кормовых угодий с одновременным внесением стартовой дозы минеральных удобрений.

В 1991 г. А. Д. Кормщиков защитил докторскую диссертацию на тему «Совершенствование сельскохозяйственных машин для механизации технологических процессов на склоновых эрозионно-опасных землях», в 2017 г. С. Л. Дёмшин – на тему «Повышение эффективности возделывания сельскохозяйственных культур в условиях Северо-Востока Европейской части РФ путем разработки multifunctional машин для обработки почвы и посева». Семь сотрудников лаборатории успешно защитили кандидатские диссертации.

Новизна почвозащитных технологических операций и сельскохозяйственных машин для улучшения травостоя лугов и пастбищ, работы

на склоновых эрозионно-опасных землях защищена более 60 авторскими свидетельствами СССР и патентами РФ на изобретения.

Лаборатория зерно- и семяочистительных машин организована в октябре 1990 г. в составе А. И. Буркова, В. Л. Андреева и Н. М. Бердышевой. Основное направление деятельности – разработка новых зерно- и семяочистительных машин и совершенствование технологии послеуборочной обработки семян зерновых, зернобобовых, крупяных культур, а также семян трав в зоне Северо-Востока европейской части Российской Федерации.

Первый заведующий лабораторией – Александр Иванович Бурков, доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель России. В настоящее время лабораторией руководит кандидат технических наук А. Л. Глушков.

В лаборатории подготовлены и защищены: три докторские – А. И. Бурков (1993 г.), В. Л. Андреев (2005 г.), М. В. Симонов (2020 г.); и 17 кандидатских диссертаций.

В первые годы работы в лаборатории были созданы две машины вторичной очистки зерна МВО-7С и МВО-10. В 1993 году машина МВО-10 успешно прошла государственные приемочные испытания и была рекомендована для постановки на серийное производство. В дальнейшем сотрудниками лаборатории созданы эффективные и экономичные пневмосепарирующие устройства и диаметральные вентиляторы для серийно выпускаемых ОАО «Воронежсельмаш» зерноочистительных машин МПО-50, МС-4,5 и семейства универсальных сепараторов УСВ-60 и СВТ-40 [6, 7].

В целом разработан ряд новых высокоэффективных зерно- и семяочистительных машин: предварительной очистки МПО-25Ф, МЗП-50; предварительно-первичной очистки МЗУ-25/15; вторичной очистки семян МВО-7С, МВО-10, МВО-20Д, АЗМ-10/5-ВРФ; пневматические сепараторы ПС-15, СП-2У-Р, СП-4У-Р, СП-7У-Р, СП-2Ф; клеверотёрки КС-1,0, К-0,3, клеверотёрки-скарификаторы КС-0,2 и КС-0,4П. Новые машины по сравнению с отечественными и зарубежными аналогами имеют меньше на 15...30 % удельную металлоёмкость, в 1,2...2,0 раза удельную энергоёмкость, выше на 10...30 % производительность при высоком качестве выполнения технологического процесса.

Машины МВО-10, МЗУ-25/15 и пневматический сепаратор ПС-15 серийно изготавливали в ОАО «Яранский механический завод», удостоены серебряной медалью и дипломом 2-ой степени «Золотая осень-2003 г.», г. Москва.

Всего с начала производства в ОАО «Яранский механический завод» и ПКБ НИИСХ Северо-Востока выпущено и реализовано машин: МВО-10 – 105 шт.; ПС-15 – 30 шт.; МЗУ-25/15 – 20 шт.; КС-1,0 – 6 шт.; К-0,3 – 56 шт.; СП-2У-Р, СП-4У-Р – 40 шт. (рис. 3.) [8, 9, 10].

Общий экономический эффект от применения научных разработок превышает 30,0 млн руб. (в ценах 1990 г.).

Технологические линии, зерноочистительные машины, воздушные системы, диаметральные вентиляторы, пылеуловители и другие устройства защищены более чем 110 авторскими свидетельствами и патентами РФ на изобретения.

В 2007 году за работу «Разработка и освоение производства высокоэффективных зерно- и семяочистительных машин» авторскому коллективу под руководством А. И. Буркова указом губернатора от 07.12.2007 № 97 присуждена Премия Кировской области в области науки и техники. Лауреатами Премии стали: д.т.н. А. И. Бурков, д.т.н. В. Л. Андреев, генеральный директор ОАО «Яранский механический завод» Д. Ф. Ефремов и главный инженер А. М. Кутюков, заведующий проектно-конструкторским отделом ПКБ Н. Л. Коньшев, к.т.н. О. П. Рошин, начальник ПКБ Ю. В. Сычуглов.

В 2002 году А. И. Буркову было присвоено звание «Заслуженный изобретатель Российской Федерации».

Лаборатория механизации животноводства организована в 1985 году. Основным направлением работы лаборатории является создание технологий и технических средств для приготовления грубых, сочных, концентрированных кормов и кормовых смесей, а также их мобильной раздаче.

Первым заведующим лабораторией, после выделения ее в самостоятельное подразделение, был В. Г. Смертин, затем последовательно руководили лабораторией Н. Ф. Баранов, О. В. Суханов, В. Д. Сапожников. С 1997 года лабораторию возглавил П. А. Савиных.

В лаборатории защищены 4 докторские диссертации – В. А. Сысуев (1994 г.), П. А. Савиных (2000 г.), А. В. Алешкин (2001 г.), В. А. Казаков (2021 г.) – и 19 диссертаций кандидата технических наук.

В лаборатории разработан ряд дробилок зерна и кормов, измельчителей и смесителей кормов, измельчителей-разбрасывателей соломы из валков, комбикормовый агрегат для крестьянских и фермерских хозяйств, машины для сухой очистки корнеклубнеплодов и их измельчения, а также установка для получения ржаной патоки и другое оборудование.



Рис. 3. Сепараторы пневматические универсальные СП-2У-Р (а) и СП-4У-Р (б)
Fig. 3. Pneumatic universal separators SP-2U-R (a) and SP-4U-R (b)

Исследованиями по разработке плющилок зерна занимались В. А. Сысуев, И. Ю. Заболотских, А. Ю. Исупов, А. М. Мошонкин, результатом их исследований являлась разработка семейства одноступенчатых и двухступенчатых плющилок зерна производительностью от 1 до 10 т/ч, рис. 4 [11, 12, 13, 14, 15].



Рис. 4. Двухступенчатая плющилка зерна ПЗД-6
Fig. 4. Two-stage grain flattener PDD-6

Лаборатория инженерно-технического развития АПК создана в 2001 году. Первый руководитель – В. С. Халтурин. Затем ей руководил кандидат технических наук О. П. Рошин.

Лаборатория занималась разработкой Системы технологий и машин сельскохозяйственного производства Северо-Восточного региона

европейской части РФ на 2001–2010 гг. Был разработан и издан в «Росинформагротех» каталог «Машины и оборудование для АПК, выпускаемые в Северо-Восточном регионе европейской части России».

Под научным руководством академика Россельхозакадемии В. А. Сысуева разработана и издана «Концепция развития механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства Северо-Восточного региона европейской части России на 2002...2010 гг.».

В составе авторского коллектива приняли участие ведущие ученые головных институтов: академики В. М. Кряжков (ВИМ), В. И. Сыроватка (ВНИИМЖ), чл.-корр. В. Г. Черников (ВНИПТИМЛ) и другие.

Проектно-конструкторское бюро (ПКБ) как самостоятельное предприятие на полном хозрасчете и отдельном балансе стало работать с 1979 г. по приказу Отделения ВАСХНИЛ по Нечерноземной зоне РФ. Основателем и первым руководителем ПКБ был кандидат технических наук Василий Иванович Рублев, который создал два отдела – конструкторский и экспериментальный. Первыми сотрудниками стали Н. Л. Конышев, В. И. Исупов, Ю. В. Сычугов.

Научные разработки ПКБ в области послеуборочной обработки зерна широко внедрялись в хозяйствах института и области.

В. И. Рублев предложил осуществлять перевод зерносушилок на электроподогрев. Зерноочистительно-сушильные линии на базе секци-

онных сушилок с приемными устройствами нашли практическое применение в хозяйствах и явились основным направлением в дальнейшей работе организации.

Главные направления работы ПКБ:

- совершенствование полевых сельскохозяйственных машин, технологий и механизации послеуборочной обработки семян, кормоприготовления и раздачи кормов в животноводстве;

- разработка, изготовление, монтаж и испытание экспериментальных образцов машин, усовершенствование существующих конструкций рабочих органов, макетов машин и орудий для механизации растениеводства, животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции;

- разработка и изготовление нестандартизированного оборудования;

- разработка новых проектов и реконструкция существующих объектов сельскохозяйственного производства для Северо-Восточного и других регионов России и стран СНГ.

В 1998 году ПКБ возглавил Ю. В. Сычугов, который руководил им до 2019 г. В этот период коллектив состоял из высококвалифицированных инженерно-технических специалистов, среди которых 3 доктора технических наук, 5 кандидатов технических наук.

Итогом многолетней работы явилось признание сотрудникам двух Премий Кировской области в области науки и техники:

- в 2007 году за работу «Разработка и освоение производства высокоэффективных зерно- и семяочистительных машин» авторскому коллективу в составе семи человек под руководством А. И. Буркова, лауреатами стали заведующий проектно-конструкторским отделом ПКБ Н. Л. Конышев и начальник ПКБ к.т.н. Ю. В. Сычугов.

- в 2011 году указом №127 от 21.10.2011 г. авторскому коллективу (ПКБ НИИСХ имени Н. В. Рудницкого) в составе десяти человек за работу «Разработка и внедрение в производство эффективных зерно- и семяочистительных машин». Руководитель работы – Н. П. Сычугов, профессор кафедры ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», доктор технических наук, профессор.

За годы существования в ПКБ освоено серийное производство более 60 конструкций новых машин и оборудования, в т. ч. изготовлены приемные устройства с аэрожелобами для зернового вороха, селекционные сушилки для семян зерновых культур и многолетних трав, сеялки СДК-2,8 и СДК-3,5 для посева семян трав в дер-

нину, пневмосепараторы ПС-15, ОПС-2Д-ОК, СП-2У-Р, машины вторичной очистки семян МВО-7, МВО-10, МВО-20Д, агрегат зерноочистительный АЗМ-5, машины для сухой очистки корнеклубнеплодов МСОК-10, МСОК-18, мобильный измельчитель-раздатчик грубых кормов ИРК-5, дробилки зерна и другие. Прошла государственные приемочные испытания и рекомендована в производство опытная партия машин предварительной очистки МПО-30 и другие.

Аспирантура. Такой результат работы Научно-инженерного центра был бы невозможен без главной движущей силы – аспирантов. В 1992 г., согласно Постановлению Комитета по высшей школе при Министерстве науки, высшей школы и технической политики РФ от 01.10.92 г. № 98 при НИИСХ Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого была открыта аспирантура. Заведующая аспирантурой Н. П. Сысуева (1992–2017 гг.) много сделала для ее развития.

Подготовка научно-педагогических работников инженерного центра в аспирантуре велась по специальности 05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства.

В 1997 г. институтом получена Лицензия на право ведения образовательной деятельности в сфере профессионального образования.

В настоящее время аспиранты научно-инженерного центра обучаются в аспирантуре по научной специальности 4.3.1 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса.

В аспирантуре, за период её существования, по научным специальностям 05.20.01 и 4.3.1. прошло обучение 68 человек, 47 из них защитили диссертации.

Диссертационный совет. С 1996 по 2000 год в Зональном НИИСХ Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого работал диссертационный совет К 020.93.01 по защите кандидатских диссертаций по специальности 05.20.01 Механизация сельскохозяйственного производства, в котором были успешно защищены 15 диссертационных работ (рис. 5).

С 2001 г. в Зональном НИИСХ Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого функционировал региональный диссертационный совет Д 006.048.01.

В 2012 г. при ГНУ «Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» Приказом Минобрнауки РФ от 09.11.2012 № 717/нк был открыт объединённый диссертационный совет ДМ 006.048.01. по специальности 05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства (технические науки).



Рис. 5. Диссертационный совет К 020.93.01 при Зональном НИИСХ Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого: 1 ряд (слева на право): П. М. Рошин, В. А. Сысуйев, А. К. Болотов, В. Р. Алешкин; 2 ряд (слева на право): И. Ф. Сергеев, В. И. Рублев, В. Л. Андреев, А. И. Бурков, А. Д. Кормщиков, Н. П. Сычугов (фото 12 апреля 1996 г.)

Fig. 5. Dissertation Council K 020.93.01 at the N. V. Rudnitsky Zonal Research Institute of the North-East: 1 row (from left to right): P. M. Roshchin, V. A. Sysuev, A. K. Bolotov, V. R. Aleshkin; 2nd row (from left to right): I. F. Sergeev, B. G. Gorbunov, V. L. Andreev, A. I. Burkov, A. D. Kormshchikov, N. P. Sychugov (photo from April 12, 1996)

С 2020 по 2022 год на базе ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» функционировал открытый Приказом Минобрнауки России от 29.01.2020 № 52/нк диссертационный совет Д 006.048.02 по специальности 05.20.01 Технологии и средства механизации сельского хозяйства (технические науки).

В настоящее время в Центре работает диссертационный совет 24.1.220.01 по научной специальности 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (Приказ Минобрнауки России об открытии совета от 21.11.2022 № 1530/нк).

Учеными секретарями совета в разные годы были доктор техн. наук В. Л. Андреев, доктор техн. наук Ф. Ф. Мухамадьяров. В настоящее время – кандидат техн. наук А. Л. Глушков.

Бессменный председатель диссертационного совета со дня открытия – академик РАН В. А. Сысуйев.

В диссертационных советах защищено 108 диссертаций, из них 17 докторских, 91 кандидатская.

Заключение. За 70-летний период развития вятской агроинженерной науки ученые Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого (ранее – Зональный НИИСХ Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого) внесли значительный вклад в научное и кадровое обеспечение аграрной науки Евро-Северо-Востока РФ. Работа продолжается в новых условиях, исходя из современных вызовов и приоритетов научно-технологического развития.

Список литературы

1. Кормщиков А. Д. Техника и технологии для склоновых земель. Теория, технологический расчет, развитие. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2003. 298 с.
2. Методика разработки адаптивно-ландшафтных систем земледелия в хозяйствах Кировской области. Б. П. Мальцев, В. А. Фигурин, А. Д. Кормщиков, В. Л. Андреев [и др.]. Киров, 2000. 60 с.
3. Влагоаккумулирующие технологии, техника для обработки почв и использование минеральных удобрений в экстремальных условиях: монография. Рязань: ГНУ ВНИМС, 2014. 246 с.
4. Сысуйев В. А., Кормщиков А. Д., Пятин А. М., Овсянников А. С. Технология и технические средства для полосного подсева семян трав в дернину (рекомендации). Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2000. 60 с.
5. Сысуйев В. А., Ковалёв Н. Г., Кормщиков А. Д., Курбанов Р. Ф., Пятин А. М., Талипов Н. Т., Дёмшин С. Л. Рекомендации по улучшению лугов и пастбищ в Северо-Восточном регионе европейской части России. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2007. 116 с.
6. Бурков А. И. Диаметральные вентиляторы зерно- и семяочистительных машин. Исследование и применение. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2008. 164 с.

7. Бурков А. И. Инерционные пылеуловители зерно- и семяочистительных машин. Разработка, исследование, применение. Киров: ГНУ НИИСХ Северо-Востока Россельхозакадемии, 2013. 156 с.
8. Бурков А. И., Сычугов Н. П. Зерноочистительные машины. Конструкция, исследование, расчет и испытание. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2000. 261 с.
9. Бурков А. И., Конышев Н. Л., Рощин О. П. Машины для послеуборочной обработки семян трав. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2003. 208 с.
10. Бурков А. И. Разработка и совершенствование пневмосистем зерноочистительных машин (монография). Киров: ФГБНУ «НИИСХ Северо-Востока», 2016. 380 с.
11. Сысоев В. А., Алешкин А. В., Кормищиков А. Д. Методы механики в сельскохозяйственной технике. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 1997. 217 с.
12. Сысоев В. А. Энергосберегающие машины и оборудование для кормоприготовления. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 1999. 294 с.
13. Сысоев В. А., Алешкин А. В., Савиных П. А. Кормоприготовительные машины. Теория, разработка, эксперимент: В двух томах. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2008. Т.1. 640 с.
14. Сысоев В. А., Алешкин А. В., Савиных П. А. Кормоприготовительные машины. Теория, разработка, эксперимент: В двух томах. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2009. Т. 2. 496 с.
15. Marczuk A., Sysuev V. A., Aleškin A. V., Savinyh P. A., Misztal W., Baran S. Podejście systemowe w badaniach maszyn do przygotowania pasz. Lublin: Towarzystwo Wydawnictw Naukowych LIBROPOLIS, 2013. 176 p.

References

1. Kormshchikov A. D. Machinery and technologies for sloping lands. Theory, technological calculation, development. Kirov: *NIISKh Severo-Vostoka*, 2003. 298 p.
2. Methodology for the development of adaptive landscape farming systems in farms of the Kirov region. B. P. Mal'tsev, V. A. Figurin, A. D. Kormshchikov, V. L. Andreev [et al.]. Kirov, 2000. 60 p.
3. Moisture storage technologies, soil treatment equipment and the use of mineral fertilizers in extreme conditions: monography. Ryazan': *GNU VNIMS*, 2014. 246 p.
4. Sysuev V. A., Kormshchikov A. D., Pyatin A. M., Ovsyannikov A. S. Technology and technical means for strip seeding of grass seeds in the turf (recommendations). Kirov: *NIISKh Severo-Vostoka*, 2000. 60 p.
5. Sysuev V. A., Kovalev N. G., Kormshchikov A. D., Kurbanov R. F., Pyatin A. M., Talipov N. T., Demshin S. L. Recommendations for improving meadows and pastures in the Northeastern region of the European part of Russia. Moscow: *FGNU «Rosinformagrotekh»*, 2007. 116 p.
6. Burkov A. I. Diametrical fans of grain and seed cleaning machines. Research and application. Kirov: *NIISKh Severo-Vostoka*, 2008. 164 p.
7. Burkov A. I. Inertial dust collectors of grain and seed cleaning machines. Development, research, application. Kirov: *GNU NIISKh Severo-Vostoka Rossel'khozakademii*, 2013. 156 p.
8. Burkov A. I., Sychugov N. P. Grain cleaning machines. Design, research, calculation and testing. Kirov: *NIISKh Severo-Vostoka*, 2000. 261 p.
9. Burkov A. I., Konyshev N. L., Roshchin O. P. Machines for post-harvest processing of grass seeds. Kirov: *NIISKh Severo-Vostoka*, 2003. 208 p.
10. Burkov A. I. Development and improvement of pneumatic systems of grain cleaning machines (monograph). Kirov: *FGBNU «NIISKh Severo-Vostoka»*, 2016. 380 p.
11. Sysuev V. A., Aleshkin A. V., Kormshchikov A. D. Methods of mechanics in agricultural machinery. Kirov: *NIISKh Severo-Vostoka*, 1997. 217 p.
12. Sysuev V. A. Energy-saving machines and equipment for feed preparation. Kirov: *NIISKh Severo-Vostoka*, 1999. 294 p.
13. Sysuev V. A., Aleshkin A. V., Savinykh P. A. Feed preparation machines. Theory, development, experiment: In two volumes. Kirov: *NIISKh Severo-Vostoka*, 2008. Vol.1. 640 p.
14. Sysuev V. A., Aleshkin A. V., Savinykh P. A. Feed preparation machines. Theory, development, experiment: In two volumes. Kirov: *NIISKh Severo-Vostoka*, 2008. Vol.2. 496 p.
15. Marczuk A., Sysuev V. A., Aleškin A. V., Savinyh P. A., Misztal W., Baran S. Podejście systemowe w badaniach maszyn do przygotowania pasz. Lublin: Towarzystwo Wydawnictw Naukowych LIBROPOLIS, 2013. 176 p.

Сведения об авторе

✉ **Сысоев Василий Алексеевич**, академик РАН, научный руководитель, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», д. 166а, ул. Ленина, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: priemnaya@fanc-sv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1172-005X>

Information about the authors

✉ **Vasiliy A. Sysuev**, academician of the RAS, academic advisor, 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/0000-0002-1172-005X>

✉ – Для контактов / Corresponding author

